

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Školní rok: 2012/13



**Optimalizace konstrukce synchronního motoru s
permanentními magnety**

**Optimization design of synchronous motor with permanent
magnets**

Diplomová práce

Řešitel: **Bc. Pavel Řezníček**

Studijní obor: 3902T005 -Automatické řízení a inženýrská informatika

Vedoucí práce: Ing. Leoš Beran, Ph.D.

Konzultant: Ing. Miroslav Novák, Ph.D.

Zadání

1. Přepočítejte analytický návrh z práce Jaromíra Šejnohy pro feritové magnety.
2. Verifikujte návrh v programu FEMM
3. Vyberte vhodné parametry pro citlivostí analýzu vzhledem k celkové účinnosti
4. Na základě vybraných parametrů optimalizujte geometrii magnetického obvodu a statorového vinutí.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem a optimalizací synchronního generátoru s feritovými magnety dle zadaných vstupních parametrů. Návrh stroje se skládá z analytického výpočtu generátoru. Po analytickém výpočtu je výstup ověřen v simulačním programu FEMM, následuje rozbor možných parametrů ovlivňujících celkovou účinnost generátoru. Na rozbor navazuje volba několika vhodných parametrů pro citlivostní analýzu vzhledem k účinnosti generátoru. Poté je provedena samotná citlivostní analýza pro vybrané parametry a optimalizace generátoru s ověřením na modelu ve FEMM.

Klíčová slova

Synchronní generátor, účinnost, optimalizace, feritové magnety, FEMM

Abstract

This thesis describes the design and optimization of a synchronous generator with ferrite magnets according to the specified input parameters. Design of machine consists of an analytic calculation of the generator. After analytical calculation is output verified in the simulation program FEMM, followed by an analysis of possible parameters influencing the overall efficiency of the generator. Analysis builds on several appropriate choice of parameters for the sensitivity analysis due to the efficiency of the generator. After it is done sensitivity analysis for selected parameters and optimization of the generator with the verification of the model in FEMM.

Keywords

Synchronous generator, efficiency, optimization, ferrite magnets, FEMM

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum 17.5.2013

Podpis

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi pomáhali se zhotovením této diplomové práce. Především chci poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Leoši Beranovi, Ph.D. za vedení a odborné rady. Dále děkuji svým rodičům a všem, kteří mě podporovali během celého studia.

Obsah

1 Úvod.....	12
2 Analýza současného stavu	13
2.1 Permanentní magnety.....	13
2.1.1 Keramické magnety.....	13
2.1.2 Magnety ze vzácných zemin.....	14
2.1.3 AlNiCo magnety.....	15
3 Návrh.....	16
3.1 Zadané parametry.....	16
3.1.1 Výpočty.....	18
3.1.2 Výpočet hlavních rozměrů generátoru.....	18
3.1.3 Výpočet vzduchové mezery.....	19
3.1.4 Výpočet statorového vinutí.....	19
3.1.5 Statorová drážka.....	20
3.1.6 Výpočty magnetických napětí a rozměrů jha rotoru a statoru.....	22
3.1.7 Výpočet magnetického napětí ve vzduchové mezeře U mĎe	23
3.1.8 Odpor statoru.....	24
3.1.9 Magnetizační indukčnost.....	24
3.1.10 Výpočet ztrát.....	28
3.1.11 Výkon generátoru a účinnost.....	30
4 Verifikace analytického výpočtu ve FEMM.....	31
4.1 Program FEMM.....	31
4.2 Postup modelování synchronního stroje ve FEMM.....	33
4.3 Vlastnosti použitých materiálů pro model generátoru.....	34
4.4 Porovnání modelu s analytickým výpočtem	37
5 Vliv parametrů na účinnost.....	38
5.1.1 Jouleovy ztráty v mědi.....	39
5.1.2 Materiál permanentních magnetů.....	40
5.1.3 Geometrie magnetů.....	40
5.1.4 Proporce rotoru a statoru.....	41
5.1.5 Velikost vzduchové mezery.....	42
5.1.6 Ztráty v železe.....	43
5.1.7 Mechanické ztráty.....	43
5.2 Vybrané parametry pro citlivostní analýzu a optimalizaci.....	44
5.2.1 Proudová hustota.....	44
5.2.2 Relativní šíře magnetů.....	45
5.2.3 Vzduchová mezera.....	46
5.2.4 Úprava poměru hloubky rotoru ku průměru rotoru.....	46
5.2.5 Volba statorových plechů.....	47
6 Optimalizace návrhu.....	48
6.1 Úvaha k volbě proudové hustoty.....	49
6.1.1 Geometrie optimalizovaného generátoru.....	50
6.1.2 Model optimalizovaného generátoru ve FEMM.....	51
6.2 Shrnutí výsledků optimalizace.....	52
6.3 Ekonomická rozvaha.....	53

6.3.1 Generátor B.....	53
6.3.2 Generátor D.....	53
6.4 Shrnutí výsledků.....	54
7 Závěr.....	55
Literatura.....	57
Příloha A	59
Příloha B	60
Příloha C	61
Příloha D	62
Příloha E.....	62
Příloha F	63
Příloha G	64
Příloha H	65
CD.....	66

Seznam symbolů a zkratk

Tab 1: Seznam symbolů a zkratk

Značka	Název veličiny	Jednotka
a	počet paralelních větví vinutí	-
b_1	rozměr drážky	m
b_4	rozměr drážky	m
b_{4c}	rozměr drážky	m
b_5	rozměr drážky	m
b_{5c}	rozměr drážky	m
b_d	šíře zubu statoru	m
B_0	koeficient pro výpočet ztráty ve vzduchové mezeře	-
B_{jr}	magnetická indukce v rotorovém jhu	T
B_{js}	magnetická indukce ve statorovém jhu	T
B_{max}	maximální hodnota indukce ve vzduchové mezeře	T
B_r	remanentní magnetická indukce PM	T
B_z	magnetická indukce zubu statoru zdánlivá	T
B_{zs}	magnetická indukce zubu skutečná	T
B_{PM}	magnetická indukce PM	T
B_δ	magnetická indukce ve vzduchové mezeře	T
$B.H_{max}$	maximální energetický součin	kJ/m^3
c_{jr}	koeficient rozptylu v rotorovém jhu	-
c_{js}	koeficient rozptylu v statorovém jhu	-
$\cos\varphi$	účinník	-
D_{jr}	střední průměr rotorového jha	m
D_{js}	střední průměr statorového jha	m
D_r	vnější průměr rotoru	m
D_s	vnitřní průměr statoru	m
D_{se}	vnější průměr statorového jha	m
E_{PM}	napětí indukované pm(fázové efektivní)	V
f	frekvence výstupního napětí	Hz
FEMM	Finite Element Method Magnetic	-
F_m	magnetomotorické napětí	A
h_1	rozměr drážky	mm
h_2	rozměr drážky	mm
h_3	rozměr drážky	mm
h_4	rozměr drážky	mm
h_5	rozměr drážky	mm
h_6	rozměr drážky	mm

h_{jr}	výška rotorového jha	mm
h_{js}	výška statorového jha	mm
h_{PM}	výška permanentního magnetu	mm
H_c	koercitivní síla PM	A/m
H_{jr}	intenzita magnetického pole rotorového jha	A/m
H_{js}	intenzita magnetického pole statorového jha	A/m
H_z	intenzita magnetického pole zubu zdánlivá	A/m
H_{zs}	intenzita magnetického pole zubu skutečná	A/m
I_s	proud statorem	A
J_s	proudová hustota pro vinutí statoru	A/mm ²
k_c	carterův koeficient	-
k_{Cus}	činitel plnění vinutí	-
k_{Fe}	činitel plnění železa	-
k_{Fejs}	korekční koef. pro ztráty v fe pro statorové jho	-
k_{Fesz}	korekční koef. pro ztráty v fe pro statorové zuby	-
k_v	koeficient pro výpočet ztráty ve vzduchové mezeře	-
k_w	činitel vinutí	-
$k_{\delta 1}$	koeficient rozptylové indukčnosti ve vzduchové mezeře	-
$k_{\delta 2}$	koeficient rozptylové indukčnosti ve vzduchové mezeře	-
k_{δ}	koeficient rozptylové indukčnosti ve vzduchové mezeře	-
k_p	koeficient pro výpočet mechanických ztrát	-
l	hloubka jádra generátoru	m
l'	ekvivalentní délka vzduchové mezery	m
L_{av}	střední délka závitu cívky	m
L_d	synchronní indukčnost	H
L_{md}	magnetizační indukčnost	H
L_{sq}	rozptylová indukčnost statoru	H
L_u	rozptylová indukčnost v drážce	H
L_w	rozptylová indukčnost na čele vinutí	H
L_z	rozptylová indukčnost v zubu	H
L_{δ}	rozptylová indukčnost ve vzduchové mezeře	H
m	počet fází	-
m_{js}	hmotnost statorového jha	kg
m_z	hmotnost zubů	kg
n	otáčky generátoru	ot./min
N	počet závitů na fázi	-
p	počet pólových dvojic	-
P	výkon generátoru	W

P_{15}	ztráta v železe pro materiál statorových plechů	W/kg
P_{Cu}	ztráty v mědi	W
P_{celk}	celkové ztráty generátoru	W
P_{el}	elektrický výkon generátoru	W
P_{ex}	přídavné ztráty	W
P_{Fe}	ztráty v železe	W
P_{Fejs}	ztráty ve statorovém jhu	W
P_{Fez}	ztráty v zubu	W
P_h	výkon generátoru na hřídeli	W
P_{mech}	mechanické ztráty	W
P_{δ}	ztráty ve vzduchové mezeře	W
q	počet drážek na pól a fázi	-
Q	celkový počet drážek	-
R	činný odpor vinutí statoru	Ω
S_c	průřez vodiče vinutí	m^2
S_{celk}	celkový průřez statorové drážky	m^2
S_{Cus}	průřez otvoru drážky nový	m^2
S_o	průřez otvoru drážky předběžný	m^2
T	krouťící moment	Nm
u	koeficient pro výpočet ztráty ve vzduchové mezeře	-
U	výstupní sdružené napětí generátoru	V
U_{mcelk}	celkové magnetické napětí	A
U_{mjr}	magnetické napětí v rotorovém jhu	A
U_{mjs}	magnetické napětí ve statorovém jhu	A
U_{mPM}	magnetické napětí permanentního magnetu	A
U_{mz}	magnetické napětí v zubu	A
$U_{m\delta e}$	magnetické napětí ve vzduchové mezeře	A
v_r	rychlost na povrchu rotoru	m/s
V_{js}	objem statorového jha	m^3
V_r	objem rotoru	m^3
W_{tp}	krok jednovrstvého vinutí	-
X_{SQ}	rozptylová reaktance statoru	Ω
X_u	rozptylová reaktance drážky	Ω
X_w	rozptylová reaktance čela vinutí	Ω
X_z	rozptylová reaktance zubů	Ω
X_{δ}	rozptylová reaktance ve vzduchové mezeře	Ω
Z_Q	počet cívek v drážce	-
α_{Cu}	teplotní odporový koeficient Cu	1/K

α_{PM}	relativní šířka magnetu	-
α_{Rv}	koeficient pro výpočet ztráty ve vzduchové mezeře	-
α_u	drážkový úhel	rad
β	zatěžovací úhel	rad
β_v	koeficient pro výpočet ztráty ve vzduchové mezeře	-
δ	vzduchová mezera	m
δ_e	ekvivalentní vzduchová mezera	m
δ_{ef}	efektivní vzduchová mezera	m
δ_{fikt}	fiktivní vzduchová mezera	m
η	předpokládaná účinnost generátoru	%
η_g	účinnost generátoru	%
κ	koeficient pro stanovení carterova koeficientu	-
λ_{lew}	měrná magnetická vodivost čela vinutí axiální	-
λ_w	měrná magnetická vodivost čela vinutí radiální	-
λ_u	měrná magnetická vodivost drážky	-
λ_z	měrná magnetická vodivost zubu	-
μ_0	permeabilita vakua	H/m
μ_{PM}	permeabilita materiálu PM	H/m
ρ_{Cu}	hustota mědi	kg/m ³
ρ_{Fe}	hustota železa	kg/m ³
ρ_{PM}	hustota PM	kg/m ³
σ_{Cu}	vodivost mědi při oteplení o 80°C	S/m
σ_{Cu20C}	měrná vodivost cu při 20°C	S/m
σ_{Tan}	tangenciální napětí	Pa
σ_{PM}	měrná magnetická vodivost PM	H/m
τ_{jr}	pólová rozteč pro střední průměr rotorového jha	m
τ_{js}	pólová rozteč pro střední průměr statorového jha	m
τ_p	pólová rozteč	m
τ_u	drážková rozteč	m
χ	poměr mezi ekv. délkou rotoru a průměrem vzduch. mezery	-
ω	úhlová rychlost magnetického pole	rad/s
Θ	oteplení vinutí	K
Φ	magnetický tok procházející vzduchovou mezerou	Wb
Φ_d	fiktivní rozptylový tok	Wb

1 Úvod

Téma diplomové práce se zabývá návrhem a optimalizací synchronního generátoru s feritovými magnety dle zadaných vstupních parametrů. Toto téma bylo zvoleno na základě dřívějšího projektu, kde jsem ověřoval analytický návrh generátoru, vycházející z bakalářské práce Bc. Jaromíra Šejnohy. Ve své práci se zabývá volbou generátoru pro malou vodní elektrárnu s turbínou Setur. Pro zvýšení účinnosti je hledán vhodný generátor na trhu pro přímé spojení turbíny a generátoru s vynecháním převodovky. Jako nejvhodnější pro mikroelektrárnu je volen synchronní generátor s permanentními magnety. Z výrobků nalezených na trhu byly vybrány tři potenciálně vhodné generátory. Pro jejich ceny a výkon byl pro danou aplikaci zvolen návrh nového generátoru přímo na míru.

Tato práce navazuje na výše zmíněný projekt, díky kterému byla zvládnuta technika modelování v prostředí FEMM při ověřování analytického návrhu generátoru.

Po zpracování semestrálního projektu vznikla myšlenka, jak ověřovaný generátor vylepšit. Vylepšení se mělo týkat účinnosti a snížení ceny generátoru.

Vhodnou cestou ke snížení ceny generátoru je použití levnějších materiálů permanentních magnetů. Cena NdFeB magnetů během posledních několika let výrazně vzrostla a myšlenka jejich nahrazení levnějším materiálem se stala aktuálním tématem. Jako vhodné pro tento úkol se jeví feritové magnety.

Cesta ke zvýšení účinnosti generátoru je směřována k vyhledání vhodných parametrů, které výslednou účinnost generátoru ovlivňují. Ověření vlivu zvolených parametrů v citlivostní analýze a jejich užití pro návrh optimalizovaného generátoru.

Cílem diplomové práce je navrhnout optimalizovaný generátor s feritovými magnety s ohledem na jeho účinnost a snížení ceny.

V práci jsou použity vzorce pro analytický výpočet generátoru, metoda konečných prvků reprezentována modelovacím prostředím FEMM. Bude vycházeno z dostupné

literatury a z vlastních poznatků z dané oblasti.

V závěru jsou shrnuty a zhodnoceny výsledky práce. Zmíněny jsou zde i směry, kterými by se práce mohla dále ubírat pro další vylepšení generátoru.

2 Analýza současného stavu

V této kapitole je stručně představena volba typu generátoru a jeho hlavních parametrů z práce Šejnohy [3]. Dále je uveden přehled permanentních magnetů.

Pro danou aplikaci ve vodní mikroelektrárně byl v [3] zvolen generátor s vyniklými póly a permanentními magnety. Použitím permanentních magnetů odpadl problém s budícím vinutím, napájením budících cívek, sběracími kroužky a uhlíkovými kartáči. Buzení cívek snižuje celkovou účinnost generátoru. Užitím permanentních magnetů je zvýšena účinnost a celý generátor je mechanicky zjednodušen. Zjednodušení se projeví prodloužením servisních intervalů. Zvyšuje se také spolehlivost zařízení a snižují se náklady na údržbu.

Nahrazení budících cívek permanentními magnety má i své nevýhody

- cena permanentních magnetů, zvláště magnetů na bázi vzácných zemin NdFeB,
- výstupní napětí mění se v závislosti na velikosti zátěže. Tato nevýhoda je v případě použití v ostrovním provozu, pro ukládání energie do akumulátorů, méně významná.

2.1 Permanentní magnety

V této kapitole uvádím přehled typů magnetů používaných v současnosti. Představuji zde běžné typy magnetů, jejich nejdůležitější parametry, jejich výrobou, křehkost, opracování a odolnost vůči agresivnímu prostředí.

2.1.1 Keramické magnety

Feritové magnety

Jedná se o nejlevnější magnety na trhu. Podle výrobního postupu se dělí na izotropní

a anizotropní.

Izotropní magnety mají prakticky ve všech směrech stejné magnetické vlastnosti. Ve srovnání s anizotropními magnety jsou levnější. Vyrábějí se tzv. suchou cestou tj. lisováním bez přítomnosti magnetického pole. Poté jsou magnetovány v magnetickém poli. Výhodou tohoto postupu je možnost magnetování podle přání zákazníka na již hotovém výlisku.

Anizotropní magnety mají dobré magnetické vlastnosti pouze v jednom směru magnetizace, v tzv. přednostní ose magnetizace. Na rozdíl od izotropních magnetů dosahují v přednostním směru magnetizace 1,5-2 krát vyšší remanentní magnetické indukce. Vyrábí se tzv. mokrou cestou. Směs je vstřikována do formy za působení magnetického pole. Magnetování je poté možné pouze ve směru, který je výrobně předurčen. Feritové magnety nepotřebují povrchovou antikorozi ochranu. Jsou křehké (keramika) a citlivé na ohyb či náraz. Opracovávají se výhradně diamantovými nástroji.

Parametry:

Remanence 0,1 T až 0,48 T

Koercitivita 50 kA/m až 360 kA/m

Pracovní teplota -40 °C až 250 °C

2.1.2 Magnety ze vzácných zemin

Samarium-kobaltové magnety

Jsou nejstarší z moderních magnetů na bázi prvků vzácných zemin a kovu. V současnosti se používají dvě intermetalické skupiny SmCo_5 a $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, z nichž druhá skupina dosahuje vyšších remanentních indukcí a vyšší teplotní stability. Vyráběny jsou metodou práškové metalurgie, většinou jako magnety anizotropní. Předností SmCo magnetů je vysoká teplotní stabilita a výborná odolnost proti korozi.

Parametry:

Remanence 0,85 T až 1,1 T

Koercitivita 620 kA/m až 840 kA/m

Pracovní teplota do 350 °C

Neodym- železo-borové magnety

Tyto magnety jsou vyráběny metodou sintrování z práškových kovů s prvkem vzácných zemin - neodymem. Ve srovnání s feritovými magnety mají podstatně vyšší remanentní indukci. Bez povrchové úpravy jsou náchylnější ke korozi. Proto bývají pokryty tenkou vrstvou niklu, stříbra, zlata a epoxidu. V porovnání s výše zmíněnými druhy magnetů, jsou méně křehké. Jejich obrábění je možné pouze před magnetizací a to diamantovými nástroji. Mezi nevýhody NdFeB magnetů patří nízká teplotní odolnost oproti feritům a v nynější době i vysoká cena.

Parametry:

Remanence 0,97 T až 1,45 T

Koercitivita 740 kA/m až 1000 kA/m

Pracovní teplota maximálně do 220 °C

2.1.3 AlNiCo magnety

Magnety AlNiCo se vyrábí již více než 50 let, a to buď odléváním, nebo práškovou metalurgií a převážně jako magnety izotropní. Jejich hlavní výhodou je nejvyšší teplotní stabilita ze všech zmíněných typů magnetů, dále vysoko položená maximální pracovní teplota a odolnost proti korozi. Nehodí se pro použití v silných demagnetizačních polích. Jejich aplikace jsou v zařízeních, kde je vyžadována vysoká teplotní stabilita a rozměr magnetu není omezen konstrukčními rozměry zařízení. [10]

Parametry:

Remanence 0,6 T až 1,16 T

Koercitivita 40 kA/m až 120 kA/m

Pracovní teplota maximálně do 550 °C

Pro přehlednost uvedena Tab. 2 výše popsaných vlastností materiálů PM.

Při volbě feritových magnetů je nutno zohlednit jejich nižší remanentní indukci a koercitivitu v porovnání s magnety NdFeB, které jsou ale výrazně dražší. Výhodou použití feritových magnetů je tedy jejich nízká cena. Magnety AlNiCo jsou nevhodné pro malou koercitivitu a SmCo jsou v podobné cenové relaci jako NdFeB.

Tab 2: Souhrnná tabulka materiálů

Druh PM	Remanence [T]	Koercitivita[kA/m]	Pracovní teplota [°C]	B.H _{max} [kJ/m ³]
Feritové	0,1 - 0,48	50 - 360	-40 - 250	6,5 - 41,8
SmCo	0,85 – 1,1	620 – 840	do 350	127 - 240
NdFeB	0,97 – 1,45	740 - 1000	do 220	183 - 398
AlNiCo	0,6 – 1,16	40 - 120	-270 - 550	9 - 72

3 Návrh

Postup analytického výpočtu generátoru je převzat z příložených materiálů k práci [1]. Jako výchozí vzor pro přepočet generátoru s NdFeB magnety na generátor s feritovými magnety byl použit upravený výpočet z práce [3], který je sepsán v prostředí Mathcad. Pro obtíže při shánění licence Mathcadu jsem přistoupil k přepsání výpočtu do m-file pro prostředí Matlab. Licence Matlabu je na univerzitní půdě dostupná.

Výpočet vycházející z materiálů [1] musel zohlednit podmínky přinášející použití slabších materiálů magnetů, jimiž se v práci [1] autoři nezabývají. Jedná se například o volbu indukce ve vzduchové mezeře pro feritové magnety, jejíž volba byla ovlivněna prací [5]. Dále byla provedena kontrola výšky magnetu, zda nemůže dojít k demagnetizaci.

3.1 Zadané parametry

Z práce [3] byly převzaty potřebné vstupní parametry pro nový přepočet generátoru pro feritové magnety. Parametry generátoru v [3] vychází z výstupních parametrů turbíny Setur, pro níž byl hledán vhodný generátor. Diplomová práce vychází pouze z parametrů generátoru, jenž byl analyticky navržen v [3]. Ve vstupních datech jsou změněny parametry zvoleného materiálu permanentních magnetů. Materiál feritových magnetů jsem zvolil MF40. Jedná se o nejsilnější feritový materiál běžně dostupný na trhu.

Přehled parametrů pro výpočet generátoru je uveden v Tab. 3.

Tab 3: Parametry generátoru pro výpočet

Parametr	Hodnota	Jednotka	Značka
Předpokládaný výkon	138	W	P
Vstupní výkon na hřídeli	200	W	P_h
Otáčky	160	ot/min	n
Výstupní napětí při n	28	V	U
Počet fází	3	-	m
Počet pólových dvojic	8	-	p
Předpokládaná účinnost	69	%	η
Koercitivita PM	$3,4 \cdot 10^5$	A/m	H_c
Remanentní indukce	0,45	T	B_r
Permeabilita vakua	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$	H/m	μ_0
Nárůst teploty vinutí	80	K	Θ
Měrná vodivost Cu při 20°C	$5,7 \cdot 10^7$	S/m	σ_{Cu20C}
Teplotní odporový koeficient Cu	$3,81 \cdot 10^{-3}$	1/K	α_{Cu}
Činitel plnění železa	0,97	-	k_{FE}
Hustota železa	$7,6 \cdot 10^3$	Kg/m ³	ρ_{Fe}
Hustota PM	$4,9 \cdot 10^3$	Kg/m ³	ρ_{PM}
Hustota mědi	8960	Kg/m ³	ρ_{Cu}
Účinník	1	-	$\cos\varphi$

zdroj [3]

Pro zpřehlednění orientace ve výpočtu uvádím jeho stručnou osnovu. Po ní následuje vlastní výpočet.

Osnova výpočtu

- Výpočet hlavních rozměrů generátoru
- Výpočet vzduchové mezery
- Výpočet statorového vinutí
- Statorová drážka
- Výpočty magnetických napětí a rozměrů jha rotoru a statoru
- Výpočet magnetického napětí ve vzduchové mezeře $U_{m\delta e}$
- Odpor statoru
- Magnetizační indukčnost

- Rozptylové indukčnosti a reaktance
- Výpočet ztrát
- Výkon generátoru a účinnost

3.1.1 Výpočty

Frekvence výstupního napětí:

$$f = \frac{n \cdot p}{60} = \frac{160 \cdot 8}{60} = 21,33 \text{ Hz} \quad (1)$$

Úhlová rychlost magnetického pole:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot 21,33 = 134,04 \text{ rad/s} \quad (2)$$

Permeabilita permanentního magnetu:

$$\mu_{PM} = \frac{B_r}{\mu_o \cdot H_c} = \frac{0,45}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 340000} = 1,0532 \text{ Hm}^{-1} \quad (3)$$

Příkon generátoru za předpokládané účinnosti 69 %:

$$P_h = \frac{P}{\eta} = \frac{134}{0,67} = 200 \text{ W} \quad (4)$$

Úhlová rychlost hřídele generátoru:

$$\omega_h = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 160}{160} = 16,76 \text{ rad/s} \quad (5)$$

Vstupní moment na hřídel generátoru:

$$T = \frac{P}{\omega_h} = \frac{134}{16,76} = 8,03 \text{ Nm} \quad (6)$$

3.1.2 Výpočet hlavních rozměrů generátoru

χ je poměr mezi hloubkou rotoru a jeho průměrem:

$$\chi = \frac{\pi \cdot \sqrt{p}}{4 \cdot p} = \frac{\pi \cdot \sqrt{8}}{4 \cdot 8} = 0,2777 \quad (7)$$

Výpočet tangenciálního napětí: [s.163.[1]]

$$\sigma_{\tan} \approx \frac{A \cdot B_{\delta \max} \cdot \cos \Phi}{\sqrt{2}} = \frac{26000 \cdot 0,4 \cdot 1}{\sqrt{2}} = 7353 \text{ Pa} \quad (8)$$

Výpočet objemu rotoru:

$$V_r = \frac{T}{2 \cdot \sigma_{\tan}} = \frac{8,03}{2 \cdot 7300} = 5,486 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 = 548,6 \text{ cm}^3 \quad (9)$$

Vnější průměr rotoru:

$$D_r = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot V_r}{\pi \cdot \chi}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 0,000548}{\pi \cdot 0,2777}} = 0,1361 \text{ m} \quad (10)$$

Ekvivalentní délka vzduchové mezery:

$$l' = \chi \cdot D_r = 0,2777 \cdot 0,1361 = 0,0378 \text{ m} = 37,8 \text{ mm} \quad (11)$$

3.1.3 Výpočet vzduchové mezery

$$\delta = 0,18 \cdot + 0,006 \cdot p^{0,4} = 0,00019378 \text{ m} = 0,19378 \text{ mm} \quad (12)$$

Pro daný typ stroje je doporučována minimálně vzduchová mezera 1 mm [s.297.[1]].

Použita byla vzduchová mezera 1,4 mm stejně jako v [3]. Úprava rozměru vzduchové mezery bude předmětem optimalizace.

Vnitřní průměr statoru:

$$D_s = D_r + 2 \cdot \delta = 0,1361 + 2 \cdot 0,0014 = 0,1389 \text{ m} = 138,9 \text{ mm} \quad (13)$$

Výpočet délky jádra statoru:

$$l = l' - 2 \cdot \delta = 37,8 - 2 \cdot 1,4 = 35 \text{ mm} \quad (14)$$

3.1.4 Výpočet statorového vinutí

Volba kroku a vinutí:

Jednovrstvé vinutí s krokem 1

$$W_{\tau p} = 1$$

Volba počtu drážek na pól a fázi :

$$\text{počet drážek na pól a fázi: } q = 1$$

Počet drážek statoru:

$$Q = 2 \cdot p \cdot m \cdot q = 2 \cdot 8 \cdot 3 \cdot 1 = 48 \quad (15)$$

Drážková rozteč:

$$\tau_u = \frac{\pi \cdot D_s}{Q} = \frac{\pi \cdot 138,9}{48} = 9,1 \text{ mm} \quad (16)$$

Pólová rozteč:

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D_s}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 138,9}{2 \cdot 8} = 27,3 \text{ mm} \quad (17)$$

Zvolená relativní šířka magnetu:

$$\alpha_{PM}=0,8$$

Maximální hodnota magnetické indukce ve vzduchové mezeře B_{max} :

$$B_{\delta}=0,45 \text{ T}$$

$$B_{max} = \frac{\pi \cdot B_{\delta}}{4 \cdot \sin\left(\frac{\alpha_{PM} \cdot \pi}{2}\right)} = \frac{\pi \cdot 0,45}{4 \cdot \sin\left(\frac{0,8 \cdot \pi}{2}\right)} = 0,3716 \text{ T} \quad (18)$$

Činitel vinutí:

$$k_w = \frac{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot W_{\tau p}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{m \cdot 2}\right)}{\frac{Q}{m \cdot p} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot p}{Q}\right)} = \frac{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot 1\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3 \cdot 2}\right)}{\frac{48}{3 \cdot 8} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot 8}{48}\right)} = 1 \quad (19)$$

Napětí indukované permanentními magnety:

$$E_{PM} = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{28}{\sqrt{3}} = 16,17 \text{ V} \quad (20)$$

Počet závitů na fázi:

$$N = \frac{\sqrt{2} \cdot E_{pm}}{\omega \cdot k_w \cdot \alpha_{PM} \cdot B_{max} \cdot \tau_p \cdot l'} = \frac{\sqrt{2} \cdot 16,17}{16,76 \cdot 1 \cdot 0,8 \cdot 0,3716 \cdot 0,0273 \cdot 0,0378} = 556 \quad (21)$$

Počet cívek v drážce: a = počet paralelních větví vinutí ($a=1$)

$$z_Q = \frac{2 \cdot a \cdot m \cdot N}{Q} = \frac{2 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 560}{48} = 70 \quad (22)$$

3.1.5 Statorová drážka

Šířka zubu statoru:

Nejprve nutno zvolit maximální indukci v zubu:

$$B_z = 1,6 \text{ T}$$

Šíře zubu:

$$b_d = \frac{l' \cdot \tau_u \cdot B_{max}}{k_{FE} \cdot l \cdot B_z} = \frac{0,0378 \cdot 0,091 \cdot 0,3716}{0,97 \cdot 0,035 \cdot 1,6} = 0,0024 \text{ m} \quad (23)$$

Výpočet statorového proudu:

$$I_s = \frac{P}{m \cdot E_{pm} \cdot \cos \varphi} = \frac{134}{3 \cdot 16,17 \cdot 1} = 2,775 \text{ A} \quad (24)$$

Průřez vodiče vinutí: zvolena proudová hustota s ohledem na ztráty vinutí $2,5 \text{ A/mm}^2$.

$$S_{cs} = \frac{I_s}{J_s} = \frac{2,775}{2,5} = 1,11 \text{ mm}^2 \quad (25)$$

Předběžný průřez otvoru drážky:

k_{Cus} je činitel plnění drážkové izolace.

$$S_o = \frac{z_Q \cdot S_{cs}}{k_{Cus}} = \frac{70 \cdot 1,11}{0,89} = 86,7 \text{ mm}^2 \quad (26)$$

Volba rozměrů a tvaru drážky

rozměry zvoleny:

$$b_1 = 0,001 \text{ m}$$

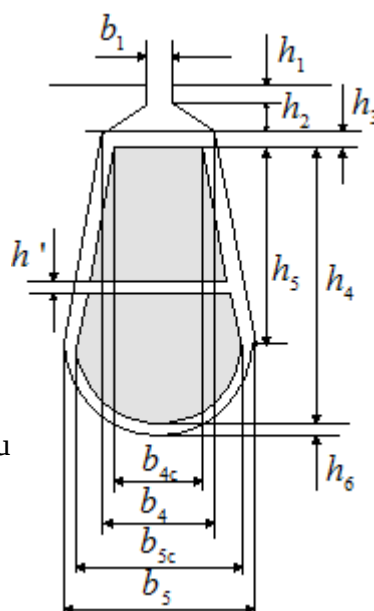
$$h_1 = 0,001 \text{ m}$$

$$h_2 = 0,001 \text{ m}$$

$$h_3 = 0,0005 \text{ m}$$

$$h_6 = 0,0005 \text{ m}$$

Vpravo na Obr. 3.1 je náčrtek řezu statorovou drážkou s vyznačenými rozměry.



Obr. 3.1: Rozměry drážky [1]

Rozměr drážky b_4 :

$$b_4 = \frac{\pi \cdot [D_s + 2 \cdot (h_1 + h_2)]}{Q} - b_d = \frac{\pi \cdot [138,9 + 2 \cdot (1 + 1)]}{48} - 2,4 = 7 \text{ mm} \quad (27)$$

Rozměr drážky b_{4c} a h_5 :

$$b_{4c} = b_4 + \frac{2 \cdot \pi \cdot h_3}{Q} - 2 \cdot h_6 = 7 + \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,5}{48} - 2 \cdot 0,5 = 6,1 \text{ mm} \quad (28)$$

Rozměr h_5 vypočten s ohledem k výše vypočtenému S_o :

$$h_5 = 0,008 \text{ m}$$

Rozměr srážky b_{5c} :

$$b_{5c} = b_{4c} + \frac{2 \cdot \pi \cdot h_5}{Q} = 6,1 + \frac{2 \cdot \pi \cdot 8}{48} = 7 \text{ mm} \quad (29)$$

Průřez otvoru drážky vinutí:

$$S_{Cus} = \left(\frac{b_{4c} + b_{5c}}{2} \right) \cdot h_5 + \frac{\pi}{8} \cdot b_{5c}^2 = \left(\frac{6,1 + 7}{2} \right) \cdot 8 + \frac{\pi}{8} \cdot 7^2 = 65,6 \text{ mm}^2 \quad (30)$$

Rozměr drážky b5:

$$b_5 = b_{5c} + 2 \cdot h_6 = 7 + 2 \cdot 0,5 = 8 \text{ mm} \quad (31)$$

Rozměr drážky h4:

$$h_4 = h_5 + \frac{b_{5c}}{2} = 8 + \frac{7}{2} = 10,6 \text{ mm} \quad (32)$$

Celkový průřez statorové drážky:

$$S_{celk} = b_1 \cdot h_1 + h_2 \cdot \left(\frac{b_4}{2} + \frac{b_1}{2} \right) + h_3 \cdot \left(b_4 + \frac{\pi \cdot h_3}{Q} \right) + h_5 \cdot \left(\frac{b_4 + b_5}{2} \right) + \frac{\pi}{8} \cdot b_5^2 \quad (33)$$

$$S_{celk} = 1 \cdot 1 + 1 \cdot \left(\frac{7}{2} + \frac{1}{2} \right) + 0,5 \cdot \left(7 + \frac{\pi \cdot 0,5}{2} \right) + 7,1 \cdot \left(\frac{7+8}{2} \right) + \frac{\pi}{8} \cdot 8^2 = 86,77 \text{ mm}^2$$

3.1.6 Výpočty magnetických napětí a rozměrů jha rotoru a statoru

Zdánlivá indukce v zubu vybrána 1,6 T

Intenzita magnetického pole H_z odečtena 1480 A/m z BH křivky materiálu M800-50A.

Skutečná hodnota magnetické indukce zubu statoru je vypočtena vztahem:

$$B_{zs} = B_z - \left(\frac{l' \cdot \tau_u}{k_{FE} \cdot l \cdot b_d} - 1 \right) \cdot \mu_0 \cdot H_z \quad (34)$$

$$B_{zs} = 1,6 - \left(\frac{0,0378 \cdot 0,0091}{0,97 \cdot 0,035 \cdot 0,0024} - 1 \right) \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1480 = 1,5927 \text{ [T]}$$

Po korekci odečtena $H_{zs} = 1465 \text{ [A/m]}$

Magnetické napětí zubu:

$$U_{mz} = H_{zs} \cdot (h_5 + h_3) = 1465 \cdot (0,0005 + 0,008) = 12,92 \text{ A} \quad (35)$$

Výpočet koeficientů pro získání magnetického napětí ve vzduchové mezeře:

$$\kappa = \frac{2}{\pi} \cdot \left[\arctg \left(\frac{b_1}{2 \cdot \delta} \right) - \frac{2 \cdot \delta}{b_1} \cdot \ln \left(\sqrt{1 + \left(\frac{b_1}{2 \cdot \delta} \right)^2} \right) \right] \quad (36)$$

$$\kappa = \frac{2}{\pi} \cdot \left[\arctg \left(\frac{0,0015}{2 \cdot 0,0014} \right) - \frac{2 \cdot 0,0014}{0,001} \cdot \ln \left(\sqrt{1 + \left(\frac{0,001}{2 \cdot 0,0014} \right)^2} \right) \right] = 0,1114$$

Carterův koeficient:

$$k_c = \frac{\tau_u}{\tau_u - \kappa \cdot b_1} = \frac{0,0091}{0,0091 - 0,1114 \cdot 0,01} = 1,0255 \quad (37)$$

3.1.7 Výpočet magnetického napětí ve vzduchové mezeře $U_{m\delta e}$

Ekvivalentní vzduchová mezera pro výpočet magnetického napětí :

$$\delta_e = k_c \cdot \delta = 1,0255 \cdot 0,0014 = 0,0014 [m] = 1,4 mm \quad (38)$$

Magnetické napětí ve vzduchové mezeře:

$$U_{m\delta e} = \frac{B_{max}}{\mu_0} \cdot \delta_e = \frac{0,3716}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,0014 = 424,56 A \quad (39)$$

Maximální magnetická indukce pro jho statoru a rotoru:

$$B_{jr} = 1,3 T \quad B_{js} = 1,3 T$$

Magnetický tok procházející vzduchovou mezerou :

$$\Phi = \alpha_{PM} \cdot B_{max} \cdot \tau_p \cdot l' = 0,8 \cdot 0,3716 \cdot 0,0273 \cdot 0,0378 = 0,000306 [Wb] = 0,306 mWb \quad (40)$$

Výška statorového jha:

$$h_{js} = \frac{\Phi}{2 \cdot k_{Fe} \cdot l \cdot B_{js}} = \frac{0,000306}{2 \cdot 0,97 \cdot 0,035 \cdot 1,3} = 0,0035 m = 3,5 mm \quad (41)$$

$$h_{jr} = h_{js}$$

Pro materiál M800-50A při indukci $B_{js} = 1,3 T$ a $B_{jr} = 1,3 T$ odpovídá $H_{js} = 304 A/m$ a $H_{jr} = 304 A/m$. Dále jsou odečteny koeficienty c_{js} a $c_{jr} = 0,33$ z [s.179.[1]]

Střední průměr statorového jha:

$$D_{js} = D_s + 2 \cdot (h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_6) + h_{js} \quad (42)$$

$$D_{js} = 138,9 + 2 \cdot (1 + 1 + 0,5 + 10,6 + 0,5) + 3,5 = 169,6 mm$$

Pólová rozteč pro střední průměr statorového jha:

$$\tau_{js} = \frac{\pi \cdot D_{js}}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 169,6}{2 \cdot 8} = 0,0333 m = 3,33 mm \quad (43)$$

Magnetické napětí statorového jha:

$$U_{mjs} = c_{js} \cdot H_{js} \cdot \tau_{js} = 0,33 \cdot 0,304 \cdot 0,0333 = 3,3 A \quad (44)$$

Výška permanentního magnetu (PM):

$$h_{PM} = \frac{U_{m\delta e} + U_{mz} + \frac{U_{mjs}}{2} + \frac{\pi \cdot c_{jr} \cdot H_{jr} \cdot (D_r - h_{jr})}{4 \cdot p}}{H_c - \frac{H_c}{B_r} \cdot B_{PM} \cdot \frac{\pi \cdot c_{jr} \cdot H_{jr}}{2 \cdot p}} \quad (45)$$

$$h_{PM} = \frac{424,56 + 12,92 + \frac{3,3}{2} + \frac{\pi \cdot 0,33 \cdot 304 \cdot (0,1361 - 0,0035)}{4 \cdot 8}}{340000 - \frac{340000}{0,45} \cdot 0,3716 \cdot \frac{\pi \cdot 0,33 \cdot 304}{2 \cdot 8}} = 0,0073 m = 7,3 mm$$

Sřední průměr rotorového jha:

$$D_{jr} = D_r - 2 \cdot h_{PM} - h_{jr} = 0,1361 - 2 \cdot 0,0073 - 0,0035 = 118 \text{ mm} \quad (46)$$

Pólová rozteč pro střední průměr rotorového jha:

$$\tau_{jr} = \frac{\pi \cdot D_{jr}}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 0,118}{2 \cdot 8} = 0,0232 \text{ m} = 23,2 \text{ mm} \quad (47)$$

Magnetické napětí rotorového jha:

$$U_{mjr} = c_{jr} \cdot H_{jr} \cdot \tau_{jr} = 0,33 \cdot 304 \cdot 0,0232 = 1,94 \text{ A} \quad (48)$$

Magnetické napětí PM:

Uvažujeme $B_{pm} = B_{max} = 0,3716 \text{ T}$

$$U_{mPM} = \frac{H_c}{B_r} \cdot h_{PM} \cdot B_{PM} = \frac{340000}{0,45} \cdot 0,0073 \cdot 0,3716 = 2059,7 \text{ A} \quad (49)$$

Celkové magnetické napětí:

$$U_{mcelk} = U_{m\delta e} + U_{mz} + U_{mPM} + \frac{U_{mjs}}{2} + \frac{U_{mjr}}{2}$$

$$U_{mcelk} = 424,56 + 12,92 + 2059,7 + \frac{2,78}{2} + \frac{1,94}{2} = 2494,1 \text{ A} \quad (50)$$

3.1.8 Odpor statoru

Sřední délka závitu cívky:

$$l_{av} = 2 \cdot l + 2,4 \cdot W_{\tau p} \cdot \tau_p + 0,1 = 2 \cdot 0,035 + 2,4 \cdot 1 \cdot 0,0273 + 0,1$$

$$l_{av} = 0,2355 \text{ m} = 235,5 \text{ mm} \quad (51)$$

Vodivost mědi při oteplení o 80°C:

$$\sigma_{Cu} = \frac{\sigma_{Cu20C}}{1 + \theta \cdot \alpha_{Cu}} = \frac{5,7 \cdot 10^7}{1 + 80 \cdot 3,81 \cdot 10^{-3}} = 4,368 \cdot 10^7 \text{ S/m} \quad (52)$$

Odpor vinutí statoru:

a – počet paralelních větví vinutí a = 1

$$R = \frac{N \cdot l_{av}}{\sigma_{Cu} \cdot a \cdot S_{cs}} = \frac{560 \cdot 0,2355}{4,368 \cdot 10^7 \cdot 1 \cdot 1,11 \cdot 10^{-6}} = 2,7 \Omega \quad (53)$$

3.1.9 Magnetizační indukčnost

Efektivní vzduchová mezera pro výpočet magnetizační indukčnosti:

$$\delta_{ef} = \frac{U_{m\delta e} + U_{mz} + U_{mPM} + \frac{U_{mjs}}{2} + \frac{U_{mjr}}{2}}{U_{m\delta e}} \cdot \delta_e \quad (54)$$

$$\delta_{ef} = \frac{424,56 + 12,92 + 2059,7 + \frac{2,79}{2} + \frac{1,94}{2}}{424,56} \cdot 0,0014 = 0,0084 \text{ m} = 8,4 \text{ mm}$$

Magnetizační indukčnost:

$$L_{md} = \frac{2 \cdot m \cdot \mu_0 \cdot l' \cdot \tau_p \cdot (k_w(1) \cdot N)^2}{\pi^2 \cdot p \cdot \delta_{ef}} \quad (55)$$

$$L_{md} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,0378 \cdot 0,0273 \cdot (1 \cdot 560)^2}{\pi^2 \cdot 8 \cdot \delta_{ef}} = 0,0036 \text{ H} = 36 \text{ mH}$$

Rozptylové indukčnosti a reaktance:

Drážkový úhel :

$$\alpha_u = \frac{p \cdot 2 \cdot \pi}{Q} = \frac{8 \cdot 2 \cdot \pi}{48} = 1,047 \text{ rad} \quad (56)$$

Výpočet koeficientů pro výpočet rozptylové indukčnosti a reaktance ve vzduchové mezeře:

$$k_{\delta 1} = \sum_{k=1}^{300} \left[\frac{\frac{(\sin[(1+2 \cdot k \cdot m) \cdot q \cdot \frac{\alpha_u}{2}])}{(\sin[(1+2 \cdot k \cdot m) \cdot W_{\tau p} \cdot \frac{\pi}{2}])} \cdot \frac{(\sin[(1+2 \cdot k \cdot m) \cdot q \cdot \frac{\alpha_u}{2}])}{(q \cdot \sin[(1+2 \cdot k \cdot m) \cdot \frac{\alpha_u}{2}])}}{(1+2 \cdot k \cdot m) \cdot k_w(1)} \right]^2 \quad (57)$$

$$k_{\delta 1} = \sum_{k=1}^{300} \left[\frac{\frac{(\sin[(1+2 \cdot k \cdot 3) \cdot 1 \cdot \frac{1,047}{2}])}{(\sin[(1+2 \cdot k \cdot 3) \cdot 1 \cdot \frac{\pi}{2}])} \cdot \frac{(\sin[(1+2 \cdot k \cdot 3) \cdot 1 \cdot \frac{1,047}{2}])}{(1 \cdot \sin[(1+2 \cdot k \cdot 3) \cdot \frac{1,047}{2}])}}{(1+2 \cdot k \cdot 3) \cdot k_w(1)} \right]^2 = 0,0365$$

$$k_{\delta 2} = \sum_{k=-1}^{-300} \left[\frac{\frac{(\sin[(1+2 \cdot k \cdot m) \cdot q \cdot \frac{\alpha_u}{2}])}{(\sin[(1+2 \cdot k \cdot m) \cdot W_{\tau p} \cdot \frac{\pi}{2}])} \cdot \frac{(\sin[(1+2 \cdot k \cdot m) \cdot q \cdot \frac{\alpha_u}{2}])}{(q \cdot \sin[(1+2 \cdot k \cdot m) \cdot \frac{\alpha_u}{2}])}}{(1+2 \cdot k \cdot m) \cdot k_w(1)} \right]^2 \quad (58)$$

$$k_{\delta 2} = \sum_{k=-1}^{-300} \left[\frac{\frac{(\sin[(1+2 \cdot k \cdot 3) \cdot 1 \cdot \frac{1,047}{2}])}{(\sin[(1+2 \cdot k \cdot 3) \cdot 1 \cdot \frac{\pi}{2}])} \cdot \frac{(\sin[(1+2 \cdot k \cdot 3) \cdot 1 \cdot \frac{1,047}{2}])}{(1 \cdot \sin[(1+2 \cdot k \cdot 3) \cdot \frac{1,047}{2}])}}{(1+2 \cdot k \cdot 3) \cdot k_w(1)} \right]^2 = 0,0599$$

$$k_{\delta} = k_{\delta_1} + k_{\delta_2} = 0,0365 + 0,0599 = 0,0964$$

Rozptylová indukčnost ve vzduchové mezeře:

$$L_{\delta} = k_{\delta} \cdot L_{md} = 0,0964 \cdot 0,0036 = 0,000348 \text{ H} = 0,348 \text{ mH} \quad (59)$$

Reaktance ve vzduchové mezeře:

$$X_{\delta} = L_{\delta} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f = 0,000348 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 21,33 = 0,0467 \Omega \quad (60)$$

Koeficienty pro výpočet rozptylové indukčnosti a reaktance v drážce:

$$\varepsilon = 1 - W_{\tau p} = 1 - 1 = 0 \quad (61)$$

$$k_1 = 1 - \frac{9}{16} \cdot \varepsilon = 1 - \frac{9}{16} \cdot 0 = 1 \quad (62)$$

$$k_2 = 1 - \frac{3}{4} \cdot \varepsilon = 1 - \frac{3}{4} \cdot 0 = 1 \quad (63)$$

Měrná magnetická vodivost drážky:

$$\lambda_u = \frac{k_1 \cdot h_4}{3 \cdot b_4} \cdot k_2 \cdot \left[\frac{h_3}{b_4} + \frac{h_1}{b_1} + \frac{h_2}{b_4 - b_1} \cdot \ln\left(\frac{b_4}{b_1}\right) \right] \quad (64)$$

$$\lambda_u = \frac{1 \cdot 0,0111}{3 \cdot 0,007} \cdot 1 \cdot \left[\frac{0,0005}{0,0076} + \frac{0,001}{0,001} + \frac{0,001}{0,007 - 0,001} \cdot \ln\left(\frac{0,007}{0,001}\right) \right] = 1,899$$

Rozptylová indukčnost v drážce:

$$L_u = \frac{4 \cdot m}{Q} \cdot \mu_0 \cdot l' \cdot N^2 \cdot \lambda_u = \frac{4 \cdot 3}{48} \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,0378 \cdot 560^2 \cdot 1,899 = 0,007 \text{ H} = 7 \text{ mH} \quad (65)$$

Reaktance v drážce:

$$X_u = L_u \cdot 2 \cdot \pi \cdot f = 0,007 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 21,33 = 0,936 \Omega \quad (66)$$

Měrná magnetická vodivost zubu:

$$\lambda_z = k_2 \cdot \frac{5 \cdot \frac{\delta}{b_1}}{5 + 4 \cdot \frac{\delta}{b_1}} = 1 \cdot \frac{5 \cdot \frac{0,0014}{0,001}}{5 + 4 \cdot \frac{0,0014}{0,001}} = 0,6604 \quad (67)$$

Rozptylová indukčnost zubu:

$$L_z = \frac{4 \cdot m}{Q} \cdot \mu_0 \cdot l' \cdot N^2 \cdot \lambda_z = \frac{4 \cdot 3}{48} \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,0378 \cdot 560^2 \cdot 0,6604 = 0,0024 \text{ H} = 2,4 \text{ mH} \quad (68)$$

Rozptylová reaktance v zubu:

$$X_z = L_z \cdot 2 \cdot \pi \cdot f = 0,0024 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 21,33 = 0,3254 \Omega \quad (69)$$

Rozptylová indukčnost a reaktance na čele vinutí:

Měrná magnetická vodivost z [s.248.[1]]

měrná magnetická vodivost čela vinutí axiální:

$$\lambda_{lew} = 0,518 - (70)$$

měrná magnetická vodivost čela vinutí radiální:

$$\lambda_w = 0,138 - (71)$$

Délka čela vinutí:

$$l_w = \frac{l_{av}}{2} - l = \frac{0,2355}{2} - 0,035 = 0,0827 \text{ m} = 82,7 \text{ mm} \quad (72)$$

Délka úseku čela závitu radiální:

$$W_{ew} = \tau_p = 0,0273 \text{ m} = 27,3 \text{ mm} \quad (73)$$

Délka úseku čela závitu axiální:

$$l_{ew} = \frac{l_w - W_{ew}}{2} = \frac{0,0827 - 0,0273}{2} = 0,0277 \text{ m} = 27,7 \text{ mm} \quad (74)$$

Koeficient rozptylové indukčnosti:

$$\lambda_w = \frac{2 \cdot l_{ew} \cdot \lambda_{lew} + W_{ew} \cdot \lambda_w}{l_w} = \frac{2 \cdot 0,0277 \cdot 0,518 + 0,0273 \cdot 0,0827}{0,0827} = 0,138 \quad (75)$$

Rozptylová indukčnost na čele vinutí:

$$L_w = \frac{4 \cdot m}{Q} \cdot q \cdot N^2 \cdot \mu_0 \cdot l_w \cdot \lambda_w = \frac{4 \cdot 3}{48} \cdot 1 \cdot 560^2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,0827 \cdot 0,138 \quad (76)$$

$$L_w = 0,0032 \text{ H} = 3,2 \text{ mH}$$

Rozptylová reaktance na čele vinutí:

$$X_w = L_w \cdot 2 \cdot \pi \cdot f = 0,0032 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 21,33 = 0,4235 \Omega \quad (77)$$

Rozptylová indukčnost statoru:

$$L_{s\sigma} = L_\delta + L_u + L_z + L_w = 0,00165 + 0,0070 + 0,0024 + 0,0032 \quad (78)$$

$$L_{s\sigma} = 0,129 \text{ H} = 129 \text{ mH}$$

Rozptylová reaktance statoru:

$$X_{s\sigma} = L_{s\sigma} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f = 0,129 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 21,33 = 1,73 \Omega \quad (79)$$

Synchronní indukčnost v ose d:

$$L_d = L_{s\sigma} + L_{md} = 0,129 + 0,0036 = 0,165 \text{ H} = 16,5 \text{ mH} \quad (80)$$

Synchronní reaktance v ose d:

$$X_d = L_d \cdot 2 \cdot \pi \cdot f = 0,165 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 21,33 = 2,215 \Omega \quad (81)$$

3.1.10 Výpočet ztrát

Ztráty lze vypočítat z hmotností částí generátoru:

Vnější průměr statorového jha:

$$D_{se} = D_{js} + h_{js} = 0,1696 + 0,0035 = 0,1731 \text{ m} \quad (82)$$

Objem statorového jha:

$$V_{js} = \pi \cdot \left[\left(\frac{D_{se}}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_{se}}{2} - h_{js} \right)^2 \right] \cdot l \quad (83)$$

$$V_{js} = \pi \cdot \left[\left(\frac{0,1731}{2} \right)^2 - \left(\frac{0,1731}{2} - 0,0035 \right)^2 \right] \cdot 0,035 = 0,0000647 \text{ m}^3$$

Hmotnost statorového jha:

$$m_{js} = V_{js} \cdot \rho_{Fe} \cdot k_{Fe} = 0,0000647 \cdot 7600 \cdot 0,97 = 0,4775 \text{ kg} \quad (84)$$

Hmotnost statorových zubů:

$$m_z = \rho_{Fe} \cdot k_{Fe} \cdot Q \cdot b_d \cdot h_5 \cdot l = 7600 \cdot 0,97 \cdot 48 \cdot 0,0024 \cdot 0,071 \cdot 0,035 = 0,207 \text{ kg} \quad (85)$$

Ztráty ve statorovém jhu a v zubech:

$$\begin{aligned} k_{Fejs} &= 1,5 \\ k_{Fez} &= 2 \end{aligned}$$

Korekční koeficienty ztrát ve statorovém jhu a v zubech [s.198.[1]]

Ztráta ve statorovém jhu:

$P_{15} = 6,6 \text{ W/kg}$ – hysterezní ztráty v železe pro materiál M800-50 při 50 Hz

$$P_{Fejs} = k_{Fejs} \cdot P_{15} \cdot \left(\frac{B_{js}}{1,5} \right)^2 \cdot m_{js} \cdot \left(\frac{f}{50} \right)^{3/2} = 1,5 \cdot 6,6 \cdot \left(\frac{1,3}{1,5} \right)^2 \cdot 0,4775 \cdot \left(\frac{21,33}{50} \right)^{3/2} = 0,8516 \text{ W} \quad (86)$$

Ztráta ve statorových zubech:

$$P_{Fez} = k_{Fez} \cdot P_{15} \cdot \left(\frac{B_{js}}{1,5} \right)^2 \cdot m_z \cdot \left(\frac{f}{50} \right)^{3/2} = 2 \cdot 6,6 \cdot \left(\frac{1,3}{1,5} \right)^2 \cdot 0,207 \cdot \left(\frac{21,33}{50} \right)^{3/2} = 1,72 \text{ W} \quad (87)$$

Ztráty v železe celkem:

$$P_{Fe} = P_{Fejs} + P_{Fez} = 0,8516 + 1,72 = 2,57 \text{ W} \quad (88)$$

Rychlost na povrchu rotoru (m/s):

$$v_r = \pi \cdot \frac{n}{60} \cdot D_r = \frac{\pi \cdot 160}{60} \cdot 0,1361 = 1,1405 \text{ m/s} \quad (89)$$

Mechanické ztráty:

Je obtížné je přesně stanovit (ztráty třením, chlazením, v ložiskách)

$$P_{mech} = k_p \cdot D_r \cdot (l + 0,6 \cdot \tau_p) \cdot v_r^2 \quad (90)$$

$$P_{mech} = 10 \cdot 0,1361 \cdot (0,035 + 0,6 \cdot 0,0273) \cdot 1,1405^2 = 0,091 \text{ W}$$

k_p - koeficient pro výpočet mechanické ztráty: [s.462.[1]]

$$k_p = 10 \text{ W s}^2 / \text{m}^4$$

Fiktivní vzduchová mezera pro výpočet ztráty ve vzduchové mezeře:

$$\delta_{fict} = \delta + \frac{h_{PM}}{2 \cdot \mu_{PM}} = \frac{0,0014 + 0,0073}{2 \cdot 1,053} = 0,0049 \text{ m} \quad (91)$$

Stanovení koeficientů pro výpočet ztráty ve vzduchové mezeře:

$$u = \left(\frac{b_1}{2 \cdot \delta_{fict}} \right) + \sqrt{1 + \left(\frac{b_1}{2 \cdot \delta_{fict}} \right)^2} = \left(\frac{0,001}{2 \cdot 0,0049} \right) + \sqrt{1 + \left(\frac{0,001}{2 \cdot 0,0049} \right)^2} = 1,1076 \quad (92)$$

$$\beta = \frac{1 + u^2 - 2 \cdot u}{2 \cdot (1 + u^2)} = \frac{1 + 1,1076^2 - 2 \cdot 1,1076}{2 \cdot (1 + 1,1076^2)} = 0,0026 \quad (93)$$

Konduktivita feritů je na rozdíl od NdFeB velmi nízká: NdFeB 670000 S/m
a ferity $1 \cdot 10^{-8}$ S/m

$$B_0 = \beta \cdot B_{max} = 0,0026 \cdot 0,3716 = 0,000967 \quad (94)$$

$$\sigma_{PM} = 1 \cdot 10^{-8} [\text{S/m}]$$

$$k_v = \sqrt{\omega \cdot 2 \cdot \pi \cdot \mu_{PM} \cdot \mu_0 \cdot \frac{1 \cdot 10^{-8}}{2}} = \sqrt{134,04 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 1,053 \cdot \mu_0 \cdot \frac{1 \cdot 10^{-8}}{2}} = 2,36 \cdot 10^{-6} \quad (95)$$

$$\beta_v = \frac{\omega \cdot 2 \cdot \pi}{\pi \cdot D_r \cdot \frac{n}{60}} = \frac{134,04 \cdot 2 \cdot \pi}{\pi \cdot 0,1361 \cdot \frac{160}{60}} = 738 \quad (96)$$

$$\alpha_{Rv} = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right) \cdot \sqrt{\sqrt{4 + \left(\frac{\beta_v}{k_v} \right)^4} + \left(\frac{\beta_v}{k_v} \right)^2} = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \right) \cdot \sqrt{\sqrt{4 + \left(\frac{738}{2,36 \cdot 10^{-6}} \right)^4} + \left(\frac{738}{2,36 \cdot 10^{-6}} \right)^2} = 3,128 \cdot 10^8 \quad (97)$$

Ztráty ve vzduchové mezeře:

$$P_\delta = \left(\frac{\alpha_{Rv}}{2} \right) \cdot \left(1 + \frac{\tau_u}{2 \cdot l} \right) \cdot \left(\frac{B_0}{\mu_{PM} \cdot \mu_0} \right)^2 \cdot \left(\frac{k_v}{\sigma_{PM}} \right) \cdot \pi \cdot D_r \cdot \alpha_{PM} \cdot l \cdot \frac{(\sqrt{2} \cdot k_v)^2}{\beta_v^2}$$

$$P_\delta = \left(\frac{3,128 \cdot 10^8}{2} \right) \cdot \left(1 + \frac{0,0091}{2 \cdot 0,035} \right) \cdot \left(\frac{0,0045}{1,053 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \right)^2 \cdot \left(\frac{2,36 \cdot 10^{-6}}{1 \cdot 10^{-8}} \right) \quad (98)$$

$$\pi \cdot 0,1361 \cdot 0,8 \cdot 0,035 \cdot \frac{(\sqrt{2} \cdot 2,36 \cdot 10^{-6})^2}{738^2} = 0,0054 \text{ W}$$

Přídavné ztráty:

Přídavné ztráty dle literatury [s.459.[1]] lze počítat jako 0,1 % z výstupního výkonu.

$$P_{ex} = \frac{0,1}{100} \cdot P_h = \frac{0,1}{100} \cdot 200 = 0,2 \text{ W} \quad (99)$$

Ztráty v mědi:

$$P_{Cu} = 3 \cdot R \cdot I_s^2 = 3 \cdot 2,7 \cdot 2,774^2 = 62,4 \text{ W} \quad (100)$$

Celkové ztráty v generátoru:

$$P_{celk} = P_{Fe} + P_{\delta} + P_{mech} + P_{Cu} + P_{ex} = 2,57 + 0,0054 + 0,091 + 62,4 + 0,2 = 65,3 \text{ W} \quad (101)$$

Vstupní výkon:

$$P_{in} = P + P_{celk} = 134 + 65,3 = 199,3 \text{ [W]}$$

$$P_{in} = 3 \cdot \left(\frac{U_{sph} \cdot E_{PM}}{X_d} \cdot \sin \delta_{load} + U_{sph}^2 \cdot \frac{X_d - X_q}{2 \cdot X_d \cdot X_q} \cdot \sin(2 \cdot \delta_{load}) \right) = 200 \text{ W}$$

Iterací vypočten zatěžovací úhel:

$$\delta_{loadN} = 0,605 \text{ [rad]}$$

Přímá složka proudu:

$$I_d = \left(\frac{\frac{U}{\sqrt{3}} \cdot (X_q \cdot \cos(\delta_{loadN}) - R \cdot \sin(\delta_{loadN})) - E_{PM} \cdot X_d}{X_d \cdot X_q + R^2} \right) = 1,034 \text{ A}$$

Kvadrurní složka proudu:

$$I_q = \left(\frac{\frac{U}{\sqrt{3}} \cdot (R \cdot \cos(\delta_{loadN}) + X_d \cdot \sin(\delta_{loadN})) - E_{PM} \cdot R}{X_d \cdot X_q + R^2} \right) = -2,55 \text{ A}$$

Nový statorový proud:

$$I_{sn} = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} = 2,76 \text{ A}$$

Pokud se nový statorový proud liší o více než 1% je potřeba I_s znovu přepočíst.

3.1.11 Výkon generátoru a účinnost

Elektrický výkon generátoru:

$$P_{el} = P_{in} - P_{celk} = 200 - 65,3 = 134,7 \text{ W} \quad (102)$$

Účinnost generátoru:

$$\eta_g = \frac{P_{el}}{P_{vst}} \cdot 100 = \frac{134,7}{200} \cdot 100 = 67,35 \% \quad (103)$$

Účinnost generátoru s feritovými magnety je menší v porovnání s generátorem s NdFeB magnety. Je to způsobeno převážně potřebou většího počtu závitů a zvětšením rozměrů generátoru. Pak je větší i délka vodičů statorového vinutí. To se projevilo ve větším odporu vodičů při zachování stejné proudové hustoty s následkem větších ohmických ztrát v mědi.

4 Verifikace analytického výpočtu ve FEMM

Je třeba ověřit analytický výpočet pomocí modelu generátoru v programu FEMM. Pro kontrolu návrhu generátoru postačí program pro analýzu ve 2D. To splňuje například program FEMM, který je oproti placeným programům a pro danou problematiku plnohodnotnou 2D náhradou. V předcházejícím semestrálním projektu byla osvojena technika modelování v prostředí FEMM při ověřování analytického návrhu generátoru.

Analytický výpočet je možno uvažovat za model, který se může jistou mírou lišit od reality. Model navržený ve FEMM používající metodu konečných prvků má podle předpokladů korelovat s realitou ve srovnání s analytickým výpočtem lépe.

4.1 Program FEMM

Program FEMM (Finite Element Method Magnetics) slouží k řešení nízkofrekvenčních elektromagnetických úloh metodou konečných prvků. Pracuje s dvourozměrnými modely (planárními nebo axiometrickými). Je to freeware program. V současnosti tento program zahrnuje problematiku:

- lineárních/nelineárních magnetostatických úloh,
- lineárních/nelineárních časově závislých harmonických magnetických úloh,
- lineárních elektrostatických úloh,
- konstantního tepelného toku.

Problémy jsou v tomto prostředí řešeny na základě numerické metody zvané „metoda konečných prvků“, dále jen MKP z anglického „finite element method“ (FEM). Metoda diskretizuje spojitý problém na určitý počet (konečný počet) elementárních prvků. Tak je vytvořen fyzikální model oblasti, ve kterém dochází k řešení daného problému. Vlastnosti tohoto fyzikálního modelu jsou určeny z jednotlivých uzlových bodů. Uzlové body jsou místa, kde se dotýkají jednotlivé sousední elementární prvky. Tyto prvky jsou

jednoduché geometrické obrazce.

Přesnost výpočtu je závislá na hustotě a zároveň velikosti elementárních prvků. Vyšší hustota sítě elementárních prvků se používá na přechodech prostředí, v rozích nebo rádiusech geometrie.

Principy základních výpočtů ve FEMMu je založeny na Maxwellových rovnicích, které jsou zjednodušeny v případě řešení nízkofrekvenčních problémů.

Program FEMM se skládá ze tří částí, a to femm.exe, triangle.exe a solvers.

Femm.exe

Příjemné a uživatelsky přívětivé jednoduché prostředí. Grafické prostředí pro tvorbu geometrie modelů umožňuje tvorbu bodů, čar, rádiusů a dalších prvků. Dále nastavení materiálových vlastností daným plochám a výběr okrajových podmínek na hranicích prostředí. Kreslení je podobné jako v programech typu CAD. Pokud je geometrie k dispozici ve formátu *.dxf je možné ji bez problému importovat do prostředí FEMM. Kreslení ve FEMM je poměrně jednoduché, a proto není nutné i složitější obrazce kreslit zvlášť v CAD programech.

Další část rozhraní tvoří magnetický, elektrostatický a teplotní postprocesor. Postprocesor je část programu, jež umožňuje zobrazení již řešeného problému.

Triangle.exe

Tato část rozděluje řešenou oblast problému na větší počet elementárních prvků - trojúhelníků, což je nutné pro řešení úloh pomocí MKP. Z těchto elementů vzniká síť prvků (mesh). Hustotě sítě odpovídá přesnost výsledků a rychlost výpočtu v dané oblasti.

Solvers

Je to tzv. řešitel, hlavní výpočtový program.

(fkern.exe – pro magnetické úlohy, belasolv – pro elektrostatické úlohy, hsolv – pro

úlohy s tepelným tokem, csolv – pro úlohy s proudovým tokem) – každý „řešitel“, obsahuje soubory dat popisujících danou problematiku a řeší parciální diferenciální rovnice dané problematiky. Výsledné řešení je složením řešení z různých solverů v dané oblasti.

4.2 Postup modelování synchronního stroje ve FEMM

Prvním úkonem v prostředí FEMM je vybrání typu problematiky a nastavení základních parametrů modelu. Poté je nakreslena geometrie podle rozměrů z analytického výpočtu přímo ve FEMM. Z geometrie je vynecháno uchycení rotoru k hřídeli a další konstrukční prvky bez vlivu na elektromagnetickou část stroje.

Používané materiály v generátoru bylo nutno ručně přidat do stávající knihovny materiálů. Následně materiály nastavit příslušným oblastem geometrie a určit okrajové podmínky na hranicích oblastí.

Okrajové podmínky jsou:

Dirichletova podmínka je definována hodnota potenciálu A na hranici, například $A=0$ pro zabránění průchodu magnetického toku skrz.

Neumannova podmínka derivace potenciálu podle hranice. Magnetický tok vstupuje do hranice pod úhlem 90° .

Robinova podmínka vyjadřuje hraniční podmínku s nedokonalou permeabilitou. Je to kombinace Dirichletovy a Neumannovy podmínky. [11]

V semestrálním projektu [7] byl pro vykreslení geometrie sepsán skript v jazyce Lua. Původní úvaha použití Lua skriptu byla pro urychlení práce při tvorbě geometrie – příprava pro diplomovou práci. V diplomové práci jsem při optimalizaci od skriptu upustil a úpravy geometrie byly prováděny často ručně pro rychlost a jednoduchost úprav. Naučil jsem se v prostředí rychle kreslit a tak jsem skript dále nepoužíval.

Jazyk LUA

Je to open source skriptovací jazyk. Používá se pro dávkové zpracování v programu FEMM. Šetří čas při opakovaných výpočtech, při měření a pravidelných změnách parametrů či geometrie modelu. Skript je možno psát přímo v konzoli v prostředí FEMM nebo jej sepsat v libovolném textovém editoru a celý spustit z FEMMu. Syntaxe

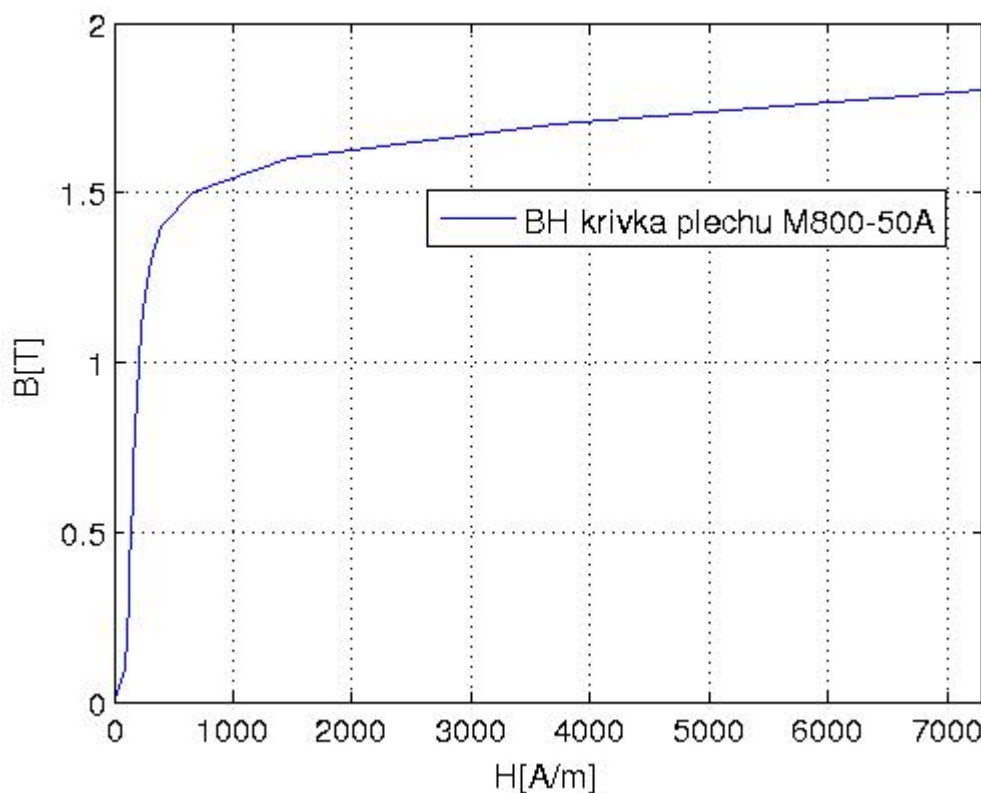
je jednoduchá. Vše, co je možné provést ručně z prostředí FEMM, je také možno provádět pomocí skriptu.

4.3 Vlastnosti použitých materiálů pro model generátoru

Statorové plechy

Statorové plechy jsou vyrobeny z oceli s příměsí křemíku pro snížení ztrát vířivými proudy. Tento materiál se nenachází v knihovně materiálů ve FEMM, proto je nutno nadefinovat nový materiál do jeho knihovny. Vstupní data jsou převzata z datasheetu viz příloha A.

M800-50A - Ztráty vířivými proudy při indukci 1,5 T a frekvenci 50 Hz jsou 6,6 W/kg. Jejich BH křivka je uvedena na Obr. 4.1.

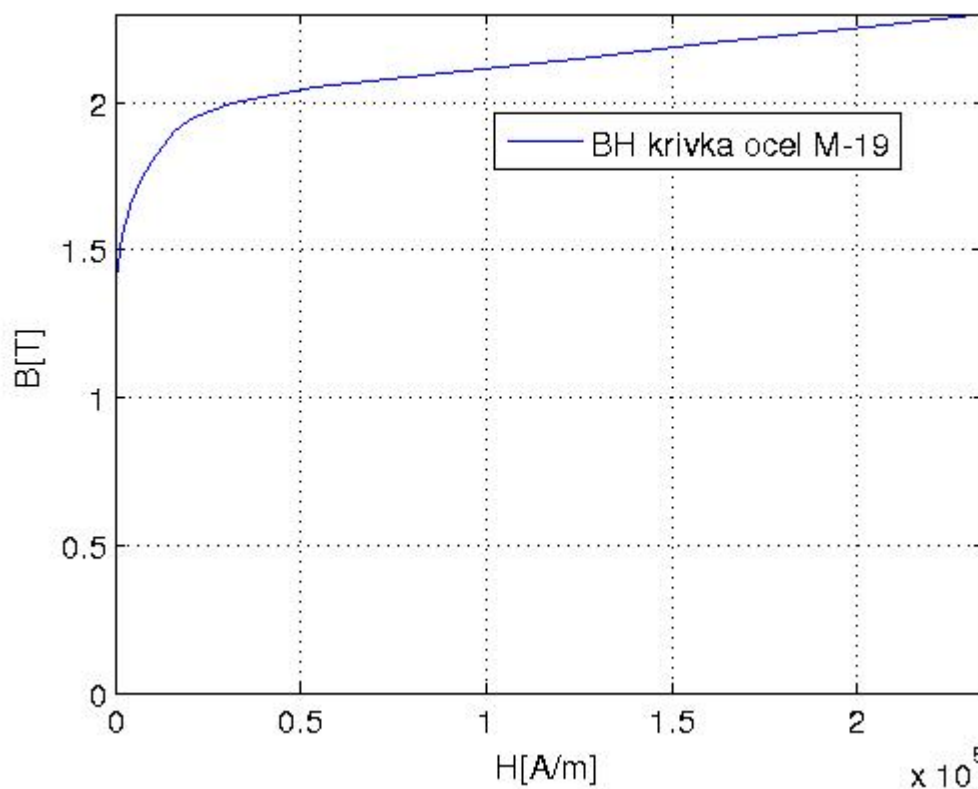


Obr. 4.1: Magnetizační křivka plechu M800-50A

Rotorové jho

Pro rotorové jho byla vybrána ocel s příměsí křemíku M-19. Tento materiál je v základních materiálech již nadefinován v knihovně FEMMu. Alternativně lze použít

běžnou magneticky měkkou konstrukční ocel, parametry jsou si blízké a neovlivní negativně vlastnosti stroje. Její magnetizační křivka je na Obr. 4.2.

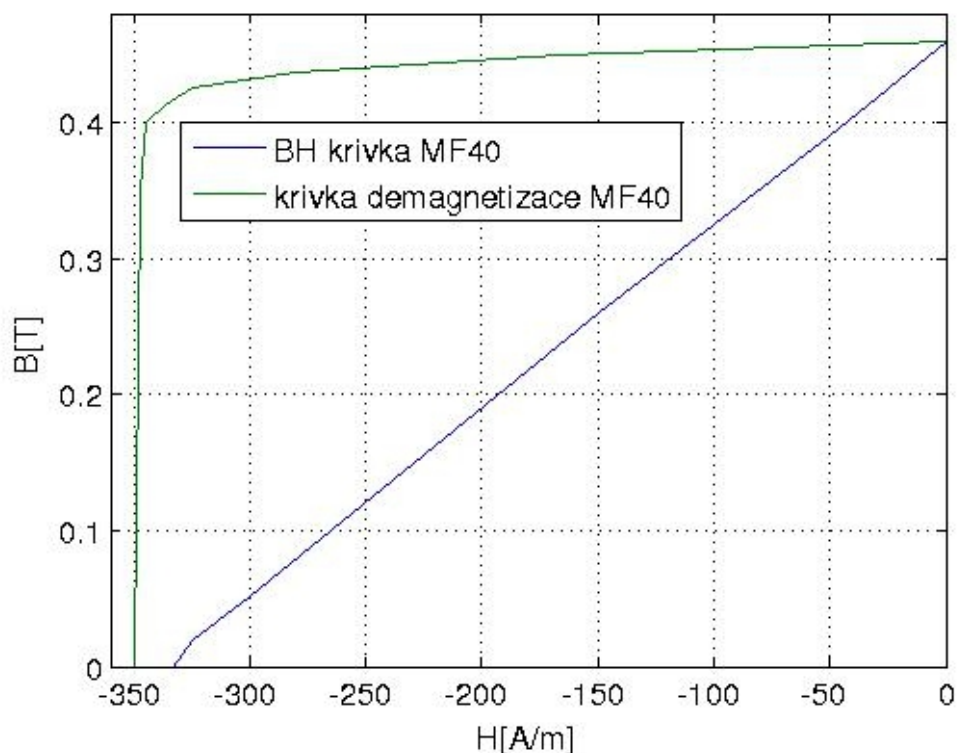


Obr. 4.2: Magnetizační křivka oceli AISI/SAE M-19

Magnety

Materiál feritových magnetů je zvolen MF40. Jedná se o nejsilnější feritový materiál běžně dostupný na trhu. Nutno ho nadefinovat jako nový materiál do knihovny ve FEMM. Vstupní data převzata z datasheetu viz příloha B. Magnetizační a demagnetizační křivka je uvedena na Obr. 4.3.

Parametry: Remanentní magnetická indukce 450-460 mT
 Koercitivita 340-360 kA/m
 Maximální energetický součin 37,6-41,8 kJ/m³

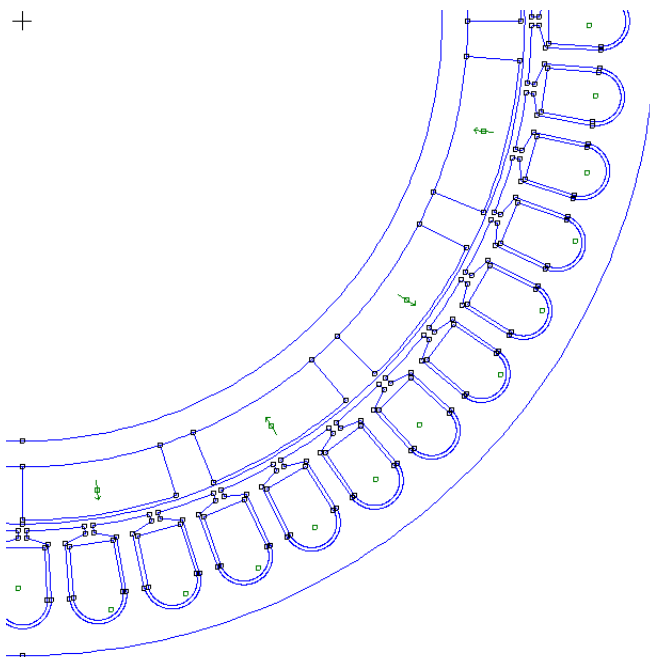


Obr. 4.3: B-H křivka a demagnetizační křivka materiálu MF40

Namodelovaná geometrie generátoru

Obr. 4.4 zobrazuje výřez z příčného řezu modelem neoptimalizovaného generátoru s feritovými magnety. Pro přehlednost a dobrou čitelnost je zobrazena pouze čtvrtina geometrie generátoru, celá geometrie je k nalezení v příloze C.

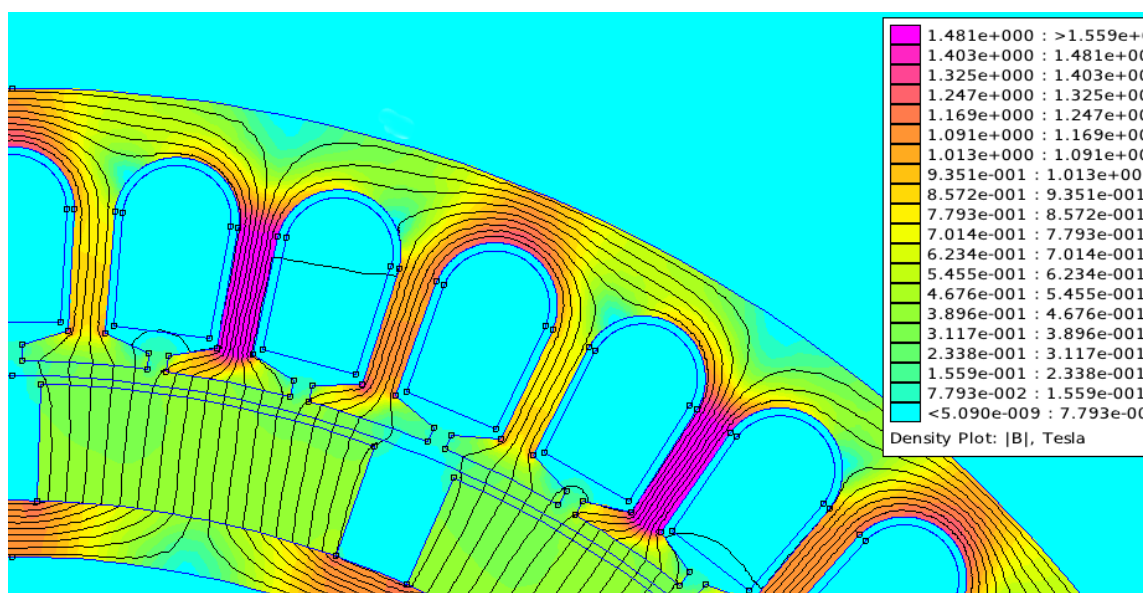
Model generátoru je proveden v podstatě jako 2D model s protažením do hloubky, která reprezentuje rozměr třetí. Hloubka obrazce je zadána při definování hlavních parametrů modelu při jeho zakládání. Tento model v porovnání s generátorem s magnety NdFeB má větší průměr rotoru, rozměry stroje narostly i do hloubky a narostl i objem permanentních magnetů.



Obr. 4.4: Výřez geometrie modelu ve FEMM

4.4 Porovnání modelu s analytickým výpočtem

Pro lepší přehlednost přikládám zobrazení výřezu (Obr. 4.5) z modelu magnetického obvodu generátoru se zobrazeným rozložením magnetické indukce. Přiložena legenda pro odečítání magnetické indukce. Porovnání parametrů z analytického výpočtu a z modelu je uvedeno číselně v Tab. 4. Celý model je k vidění v příloze D.



Obr. 4.5: Rozložení indukce v generátoru

Tab 4: Tabulka porovnání parametrů

Srovnání parametrů z analytického výpočtu s modelem			
Parametr	Jednotka	Analytický výpočet	Model
Maximální indukce v zubu	[T]	1,6	1,56
Maximální indukce ve statorovém jhu	[T]	1,3	1,26
Maximální indukce v rotorovém jhu	[T]	1,3	1,27

Porovnání je potřeba k ověření, zda nedochází k přesycování částí magnetického obvodu, a tak nalezení případně špatně navrženého rozměru této části magnetického obvodu. Volená indukce v analytickém návrhu je výchozí hodnotou pro výpočet rozměrů části magnetického obvodu. Například šíře zubu vychází ze zvolené indukce v zubu 1,6 T a indukce ve vzduchové mezeře, viz vztah (23). Pokud v zubu nepřesahuje indukce zvolenou hodnotu indukce, je šíře zubu navržena správně.

Analýzou ve FEMM bylo ověřeno, že by nemělo docházet k přesycování materiálů.

Indukce ve vzduchové mezeře

Indukce ve vzduchové mezeře B_{\max} je návrhová hodnota indukce a vychází z indukce, kterou dokáže poskytnout permanentní magnet. Reprezentuje amplitudu základní harmonické složky ve vzduchové mezeře magnetického obvodu. Vzhledem k obdélníkovému tvaru permanentního magnetu se časový průběh indukce zhruba přibližuje obdélníku. Maximální hodnota průběhu je vypočtena ze vztahu (18). Rozložením průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře v modelu FEMM na harmonické složky vychází první harmonická cca 0,45 T.

5 Vliv parametrů na účinnost

Celkovou účinnost generátoru ovlivňuje několik parametrů o různě velkém významu. Nejvýznamnějším parametrem, který ovlivňuje celkovou účinnost, jsou ztráty ve vinutí, ostatní parametry jsou s ním často úzce provázány a tedy i ovlivňují ztráty ve vinutí. Postupně budou zmíněny předpokládané parametry a směry, které mají vliv na celkovou účinnost stroje.

5.1.1 Jouleovy ztráty v mědi

Touto problematikou se Vorel zabývá ve své práci [s.87.[6]] v kapitole 10.6.:

„Ohmické ztráty ve vinutí statoru:

pro ohmické ztráty ve vinutí jedné fáze statoru lze napsat vztah:

$$P_{Cu} = R \cdot I_{\text{fef}}^2 \quad (104)$$

R je odpor vinutí. Vyjádříme si odpor pomocí délky, průřezu a měrného odporu materiálu vodiče. Efektivní hodnotu fázového proudu vyjádříme pomocí průřezu vodiče a proudové hustoty. Pak dostáváme:

$$P_{Cu} = R \cdot I_{\text{fef}}^2 = \frac{\rho \cdot l}{S} \cdot \sigma^2 \cdot S^2 = \rho \cdot \sigma^2 \cdot V_{Cu} \quad (105)$$

l je celková délka vodiče vinutí, S je jeho průřez a V_{Cu} objem, ρ je měrný odpor materiálu vodiče (měď) .

Vidíme, že ztrátový výkon je při dané proudové hustotě přímo úměrný objemu vinutí, tj. roste se jmenovitým momentem stroje. Je zřejmé, že z hlediska minimalizace těchto ztrát je vhodné konstruovat stroj pro daný jmenovitý moment s co nejmenším objemem statoru.

Z hlediska ohmických ztrát ve vinutí není vhodné konstruovat stroje s tzv. strmým provedením - s velkým průměrem a malou osovou délkou.

Ze vztahu (104) je dále patrné, že ztrátový výkon je při daném objemu vinutí úměrný kvadrátu proudové hustoty. Použijeme-li při stejném fázovém proudu vinutí s k-krát větším průřezem vodičů (k-krát menší proudová hustota), pak objem vinutí vzroste rovněž k-krát. Vzhledem ke kvadrátu proudové hustoty ve vztahu (105) ovšem ohmické ztráty k-krát klesnou.”

Nejvýznamnější parametr ovlivňující ztráty v mědi je proudová hustota. Se snížením proudové hustoty je zvětšena plocha drážky statoru a délka magnetického obvodu. Zároveň se snížením proudové hustoty klesne nejen odpor mědi, ale sníží se i její oteplení. To přinese nižší odpor vinutí při takto snížené provozní teplotě. To je patrné ze vzorců (52 a 53). Ohmické ztráty jsou nejvýznamnější položkou celkových ztrát

generátoru pracujícího na nízkých frekvencích.

Následuje výčet dalších parametrů ovlivňujících Jouleovy ztráty.

5.1.2 Materiál permanentních magnetů

Vorel ve své práci [s.81.[6]] uvádí: „Materiály vhodné pro výrobu permanentních magnetů se musí vyznačovat velkou plochou hysterezní smyčky. Požadujeme co nejvyšší remanentní indukci i koercitivní intenzitu. Důležitým kritériem srovnání magnetů je maximální objemová hustota energie magnetického pole - $0,5(B.H)_{\max}$, kterou magnet vybudí v příslušném pracovním bodě druhého kvadrantu hysterezní smyčky. Z hlediska nebezpečí odmagnetování magnetu je důležitý i tvar hysterezní smyčky.”

Pokud by měl být zvolen vhodný materiál permanentního magnetu s ohledem na účinnost stroje a bez ohledu na ekonomickou stránku problému, volba by směřovala k NdFeB magnetům. Materiály s vysokým energetickým součinitelem $B.H_{\max}$ obecně přinášejí menší rozměry stroje. Použitím materiálu s vyšší magnetickou indukcí získáme nižší počet závitů na potřebné indukované napětí. To je dobře patrné ze vzorce (21). Tím je dosaženo nižšího odporu vinutí a snížení ztrát v něm. Po ekonomické stránce se pro stroje, které nejsou omezeny zástavbovým prostorem, setrvačností a hmotností, jeví vhodnými magnety feritové.

5.1.3 Geometrie magnetů

Geometrii magnetů lze rozdělit do několika částí

- relativní šířka magnetů,
- tvar magnetu, případná kombinace s pólovým nástavcem,
- uložení magnetu na/v rotoru.

Relativní šířka magnetu ovlivní počet závitů při stejném indukovaném napětí, větší relativní šířka přináší nižší počet závitů, při stejném průřezu vodiče se zmenší odpor vinutí a zmenší ztráty. Předpokládaný vliv relativní šíře permanentních magnetů bude

menší než vliv proudové hustoty. Stoprocentní relativní šíře magnetů je v praxi nepoužitelná, dochází k magnetickému zkratu v místě styku sousedících pólů.[s.304.[1]] V praxi se obvykle nedosahuje šířek větších než 0,85. Relativní šířka ovlivňuje nasycení obvodu a tak maximální relativní šíře je omezena v dané konstrukci tak, aby nedocházelo k přesycování magnetického odvodu.

Zároveň je nutno brát v úvahu fakt, že oproti vypočtenému rozměru (či α_{PM}) je kvůli 5-8% ztrátám toku nutné o tento rozdíl magnet v reálné aplikaci zvětšit. Tvar magnetu má vliv i na tvar indukovaného napětí. Při $\alpha_{PM} = 2/\pi$ odpovídá tvar indukovaného napětí nejbližší sinusovému průběhu. S rostoucí relativní šířkou a při stejné výšce magnetu se indukované napětí deformuje více ke tvaru obdélníkovému průběhu.

Tvarem, respektive nestejnou tloušťkou magnetu po jeho délce, lze ovlivnit tvar indukovaného napětí. Touto analýzou se tato práce nezabývá, proto nebude dále uvažována.

Uložení magnetu na povrchu rotoru nebo v rotoru tangenciálně ovlivní velikost indukce ve vzduchové mezeře a projeví se pozitivně na zmenšení velikosti rotoru. To může být významné pro použité magnetické materiály s nízkým $B \cdot H_{max}$ a tedy i nízkou remanentní indukcí. Menší rotor znamená i zmenšení statoru a s tím související zmenšení délky vodičů vinutí, má tedy vliv na snížení ohmických ztrát.

5.1.4 Proporce rotoru a statoru

Vorel ve své práci [6] zmiňuje: „Volba proporcí stroje mezi osovou délkou a průměrem je technickým kompromisem mnoha protichůdných kritérií, např:

- minimální objem rotoru,
- minimální objem statoru, s tím související objem vinutí - ohmické ztráty atd.,
- dosažitelnost velkých otáček (tj velkého výkonu),
- požadovaný moment setrvačnosti (malý nebo velký),
- rozptyl, s tím související realizovatelnost velkého počtu pólů a indukčnost vinutí.“

V této práci se nás týká pouze snaha zmenšení ohmických ztrát. Otáčky jsou dány aplikací a počet pólů je určen již v zadání. Moment setrvačnosti není nutno vyhodnocovat – stroj pracuje bez výrazných změn otáček a nepotřebuje ani velký moment setrvačnosti na případné vyrovnávání kolísání proudu vody.

Dále Vorel ve své práci [s.88.[6]] uvádí: „Z hlediska ohmických ztrát ve vinutí není vhodné konstruovat stroje s tzv. strmým provedením - s velkým průměrem a malou osovou délkou.“

Při konstruování s ohledem na zamezení strmého provedení je návrh limitován tvarem drážky, která se při zmenšování průměru statoru prohlubuje a zužuje. Zde je nutno do statorové drážky uložit vinutí a izolaci, a tak je jejich rozměry omezen tvar a rozměr drážky. Dále zmenšování průměru statoru ovlivňuje vliv parametru χ na celkovou účinnost stroje. Podrobněji je tento vliv zpracován v kapitole (5.2.4).

5.1.5 Velikost vzduchové mezery

Velikost vzduchové mezery je volba s ohledem na požadované vlastnosti stroje související s vlivem reakce kotvy a s ohledem na rozptyl a mechanické vlastnosti.

Vliv vzduchové mezery na reakci kotvy - velká mezera (včetně magnetu, je - li ze vzácných zemin) - malá hodnota indukce reakčního pole kotvy (statoru) - napětově tvrdý stroj jako generátor.

Volba velké vzduchové mezery může způsobit potíže s rozptylem, (v případě, kdy je délka magnetu menší, nežli pětinasobek vzduchové mezery, může dojít k významnějšímu negativnímu ovlivnění rozptylu a v souvislosti s tím k poklesu momentu stroje). Je-li tloušťka vzduchové mezery l_v , pak je na mezeře úbytek magnetického napětí, kdy B je budící indukce.

$$F_v = H_v l_v = \frac{B}{\mu_0} l_v \quad (106) [6]$$

Dále uvádí Vorel [6] omezení: „Zvětšování vzduchové mezery naráží na dvě základní omezení:

- 1) *Malá magnetická vodivost vzduchové mezery (velká délka mezery) způsobuje velký odklon zatěžovací přímky od osy B. Je třeba velké magnetické napětí na vybuzení budící indukce v této mezeře. Z toho plyne nutnost velké tloušťky magnetu. Při použití obyčejných magnetů (AlNiCo, ferit) může vycházet při velké vzduchové mezeře nereálně velká potřebná tloušťka magnetu.*
- 2) *Je-li vzduchová mezera příliš velká (větší nežli cca 0,2 délky pólu), začnou se nepříznivě uplatňovat rozptylové toky.*

Malá magnetická vodivost magnetického obvodu stroje způsobuje i malou indukčnost stroje L. V generátorickém režimu se pak stroj jeví jako napěťově tvrdý, protože na malé indukčnosti vinutí vznikají malé napěťové úbytky u_L svázané s časovou derivací proudů:

$$u_L = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (107) \quad "$$

5.1.6 Ztráty v železe

Ztráty v železe závisí na frekvenci změn magnetického pole, dosahované indukci v plechu a na ztrátách udávaných výrobcem na jednotku hmotnosti, jak je patrné ze vzorce (84). Výběr plechů s nízkou hysterezní ztrátou je pro malé nízkootáčkové stroje s ohledem na celkovou účinnost méně významný parametr.

5.1.7 Mechanické ztráty

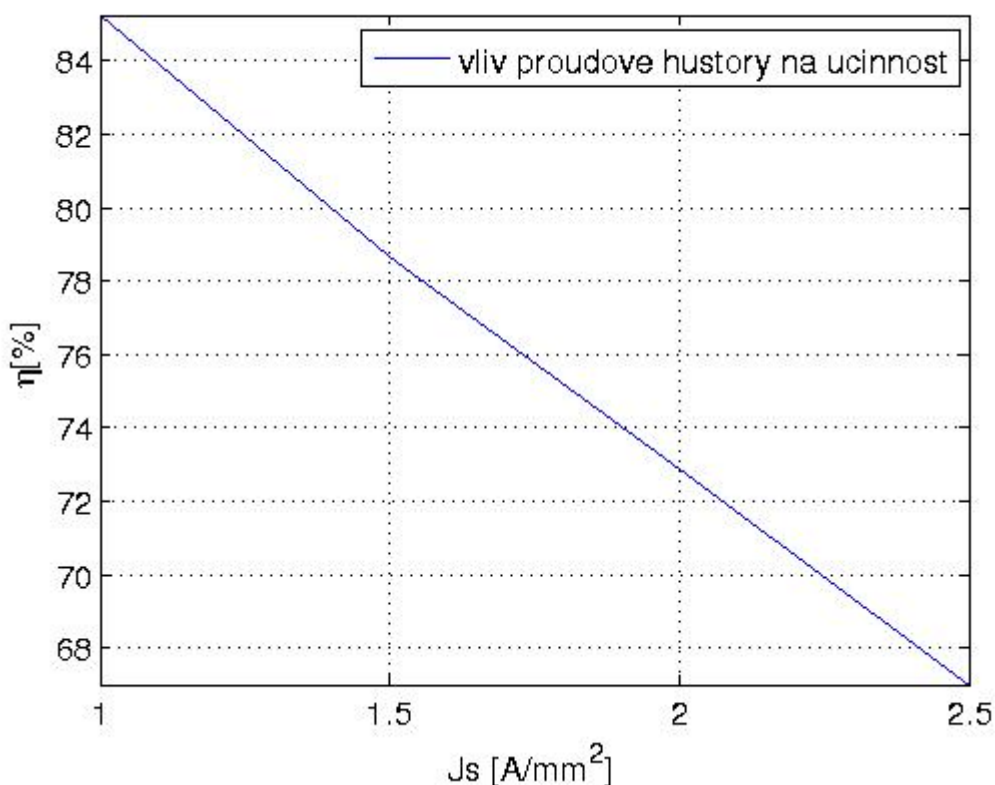
Mechanické ztráty tvoří malou část ztrát, pohybují se řádově v promile z výkonu stroje. Přesněji se určují experimentálně. Koeficienty pro výpočet ztrát jsou uvedeny v [s.462. [1]], viz vzorec (88). Mezi mechanické ztráty lze počítat i přídavné ztráty na chlazení. Vzorec (97) a postup v [s.459.[1]].

5.2 Vybrané parametry pro citlivostní analýzu a optimalizaci

Jednoparametrová citlivostní analýza

Pro citlivostní analýzu je použit přepočtený analytický výpočet s jedním proměnným parametrem, zbylé parametry zůstávají neměnné. Citlivostní analýza znázorňuje závislost celkové účinnosti generátoru na zvoleném parametru, který je proměnný ve vybraném vhodném intervalu.

5.2.1 Proudová hustota



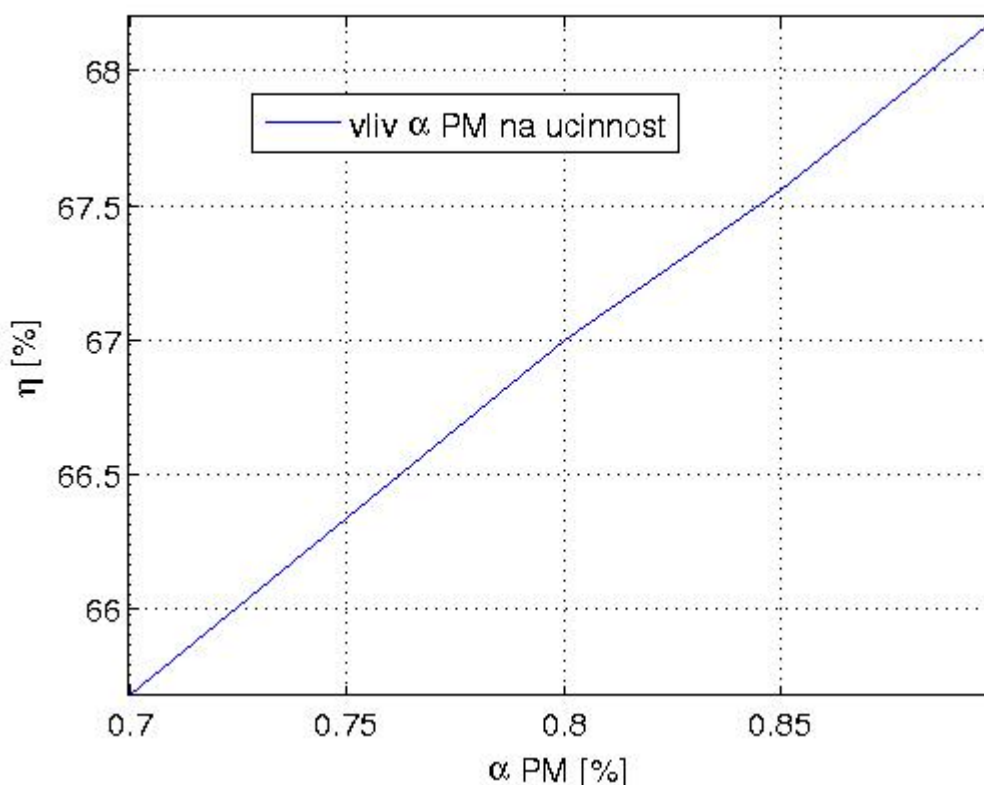
Obr. 5.1: Graf celkové účinnosti závislé na proudové hustotě vodiče

Nejvýznamnější parametr ovlivňující celkovou účinnost je zvolená proudová hustota vodiče. Zde je největší potenciál pro zvýšení účinnosti generátoru. Je nutno uvážit vhodný kompromis mezi množstvím mědi v generátoru a získanou účinností. Generátor pro danou aplikaci není téměř omezen zástavbovým prostorem, hmotností a momentem setrvačnosti. Pro nízké proudové hustoty dochází k horšímu využití plochy drážky, kdy velký průřez vodiče, respektive i nevyužitý prostor kolem vodičů většího průřezu zabírá poměrně velké procento plochy drážky.

Rozsah proudové hustoty pro citlivostní analýzu byl zvolen $J_s=2,5$ až 1 A/mm^2 . Vliv proudové hustoty je podle očekávání dominantním parametrem, jak je patrné i z Obr. 5.1.

5.2.2 Relativní šíře magnetů

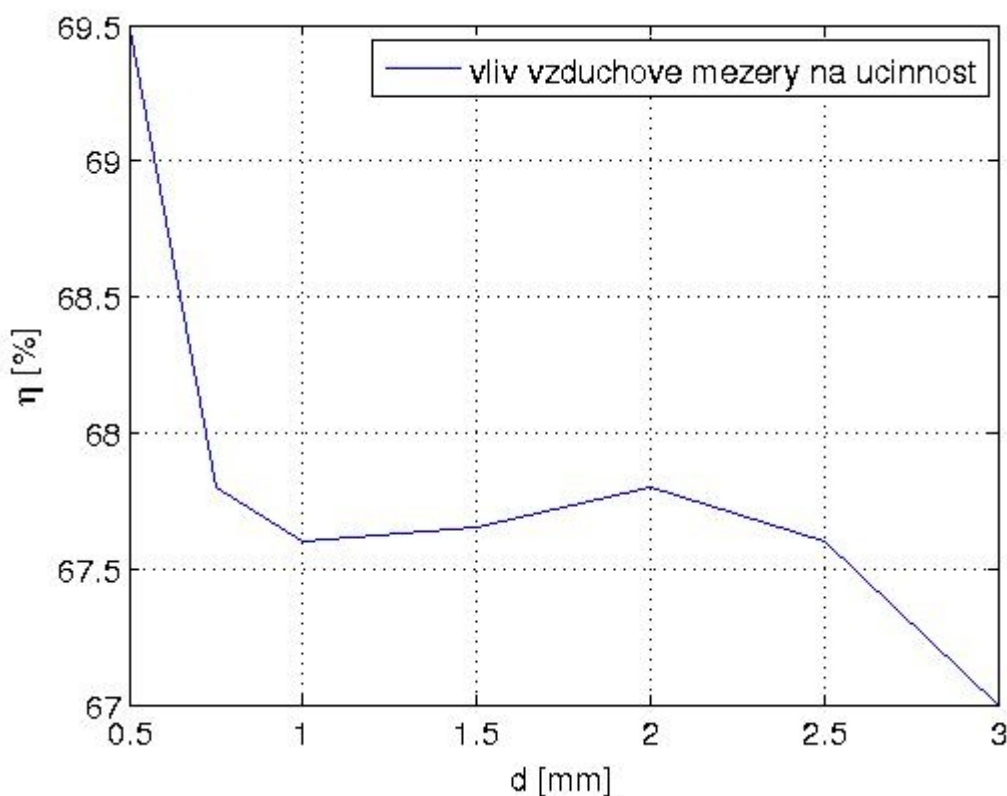
Relativní šíře magnetů je dalším parametrem ovlivňujícím celkovou účinnost generátoru. Relativní šíře magnetů je omezena shora maximálním označením 1. Při relativní šíři 100 % by v místě kontaktu mezi sousedními magnety došlo ke zkratu magnetického obvodu. Horní hranice po provedení několika simulací s danou výškou magnetu a vzduchovou mezerou z prvního výpočtu ve FEMM byla zvolena 0,9. Výpočet citlivostní analýzy z analytického návrhu by při překročení daného horního omezení nezohlednil magnetický zkrat a jeho přínos účinnosti by neodpovídal reálným hodnotám. Vliv relativní šíře permanentních magnetů je výrazně menší ve srovnání s proudovou hustotou. Rozdíl účinností v uvedeném rozsahu je 2,5 %, jak je patrné z Obr. 5.2.



Obr. 5.2: Graf závislosti celkové účinnosti na relativní šíři permanentních magnetů

5.2.3 Vzduchová mezera

Její vliv na celkovou účinnost je předpokládán výrazně menší ve srovnání s proudovou hustotou vodiče. Samotné ztráty ve vzduchové mezeře jsou menší nežli 100 mW. Vzduchovou mezerou je ovlivněna velikost magnetického odporu vzduchové mezery a tedy i magnetický odpor celého magnetického obvodu. Maximální hranice vzduchové mezery byla zvolena tak, aby nedocházelo k nežádoucímu rozptylu. Minimální hranice intervalu byla odhadnuta jako kompromis mezi doporučenou velikostí vzduchové mezery pro stroje s permanentními magnety a dolním omezením pro zabránění mechanického kontaktu statoru a rotoru. Vliv v daném rozsahu je zobrazen na Obr. 5.3.



Obr. 5.3: Graf závislosti celkové účinnosti na velikosti vzduchové mezery

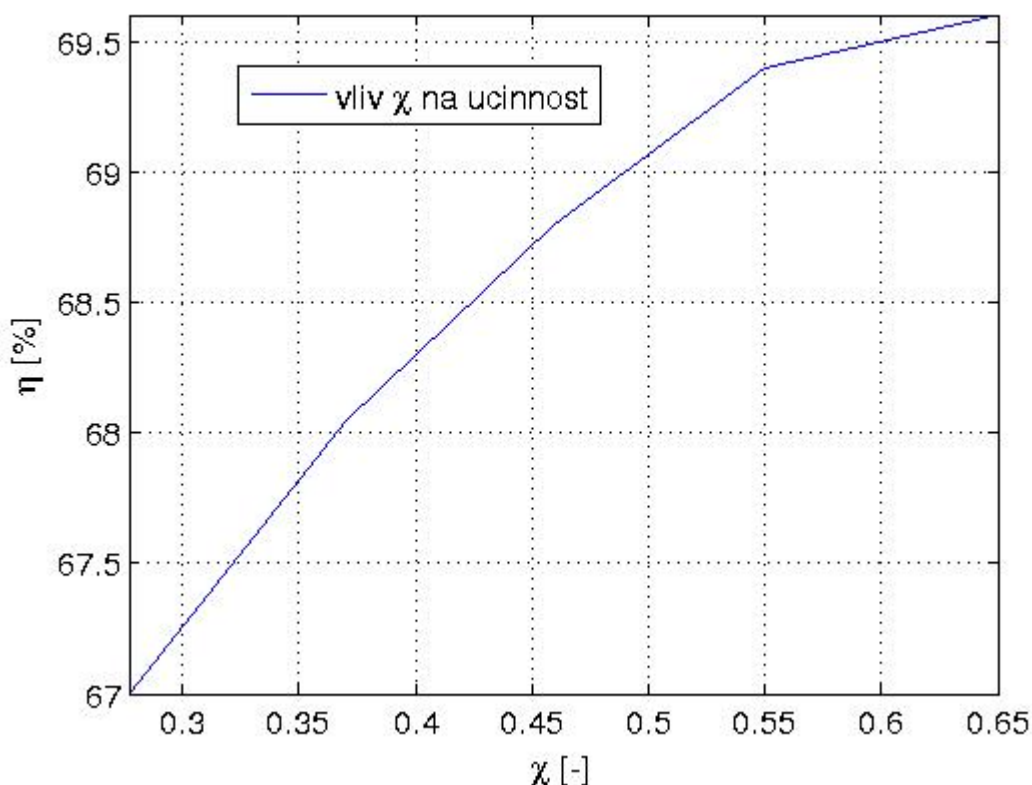
Rozsah velikosti vzduchové mezery pro citlivostní analýzu zvolen 0,5 až 3 mm.

5.2.4 Úprava poměru hloubky rotoru ku průměru rotoru

Přínosem tohoto parametru je hlavně zmenšení objemu mědi při zachování průřezu

vodiče se zmenšením ztrát ve vinutí. Má vliv na zvyšování účinnosti. Při výpočtu je uvažován objem rotoru konstantní a mění se pouze poměr mezi hloubkou rotoru a jeho průměrem. Parametr je značen jako χ .

Při poměru vyšším nežli 0,65 přestává mít výraznější vliv na účinnost a dochází k omezení rozměrů drážek statoru pro vkládání vodičů vinutí. Viz Obr. 5.4.



Obr. 5.4: Graf závislosti celkové účinnosti na poměru χ

Rozsah poměru χ rotoru ku délce rotoru je zvolen od 0,25 do 0,65.

5.2.5 Volba statorových plechů

Po konzultaci s firmou ATAS byly zvoleny statorové plechy M700-50A. Mají menší hysterezní ztráty nežli M800-50A v prvním návrhu, pro dosažení ještě menších ztrát v plechu by bylo možné použít například M400-50A nebo M230-50A. Protože generátor pracuje na nízké frekvenci, budou ztráty v železe malé. Přínos nákupem speciálních plechů je však natolik nízký, že byl zvolen plech M700-50A běžně používaný výrobcem.

Při nahrazení plechů M800-50A plechy M700-50A se ztráta v železe zmenšila z 3,16 W na 2,57 W. Na celkové účinnosti je přínos ke zvýšení účinnosti cca 0,3 %. Vliv plechů s nižšími ztrátami je u stroje pracujícího na nízké frekvenci velmi malý, jak je z porovnání vidět. V Tab. 5 byly uvedeny přínosy parametrů v daných intervalech k celkové účinnosti.

Tab 5: Souhrnná tabulka procentuálního přínosu parametrů

Parametr	Značka a jednotka	Interval	Vliv na η [%]
Proudová hustota	J_s [A/mm ²]	1:2,5	18,25
Relativní šířka magnetu	APM [-]	0,7:0,9	2,5
Velikost vzduchové mezery	d [mm]	0,5:3	2,5
Poměr χ	χ [-]	0,277:0,65	2,6
Změna plechů	- [-]	-	0,3

6 Optimalizace návrhu

Byly vybrány čtyři parametry, které různě významně přispívají ke zvýšení účinnosti stroje. Zahrnou-li se všechny parametry z citlivostních analýz do jednoho analytického výpočtu, je předpokládána největší účinnosti v rámci možností daných vybranými parametry. Při volbě velikosti konkrétních parametrů je nutno přihlídnout k mnoha omezením pro tyto parametry.

Volba vzduchové mezery - její přínos účinnosti není významný jako přínos proudové hustoty a je nutno zohlednit vliv odporu vzduchové mezery na tloušťku magnetu, zároveň s kontrolou výšky magnetů kvůli zamezení demagnetizace. Byla zvolena 2mm vzduchová mezera - kompromis mezi rostoucí tloušťkou magnetu a snížením indukčnosti stroje.

Volba relativní šíře magnetů (α_{PM}) - vzhledem k výrazně levnějšímu materiálu (ferit vs NdFeB), je navýšení šířky permanentních magnetů s přínosem cca 2,5 % k účinnosti možné. Bude použita relativní šíře 0,9.

Volba poměru mezi hloubkou a průměrem rotoru - vliv parametru je v daném rozsahu malý (2,5 %). Je zvolen poměr 0,65, kdy ještě nedochází k výraznějšímu omezení rozměrů statorové drážky.

Spojením výše jmenovaných parametrů, bez změny proudové hustoty se účinnost zlepší z původních 67 % na 71 % při $\alpha_{PM} = 0,9$, $d = 2 \text{ mm}$, $\chi = 0,65$ a $J_s = 2,5 \text{ A/mm}^2$.

Při volbě proudové hustoty je nutno uvážit návratnost při zvětšeném objemu mědi. Proto byla vypracována úvaha k návratnosti zvětšení objemu mědi.

6.1 Úvaha k volbě proudové hustoty

Byl proveden výpočet pro zjištění návratnosti vynaložených finančních prostředků. Navýšením průřezu mědi dojde ke zvýšení účinnosti zařízení a při dodržení níže popsaných podmínek bude navracena investice ve formě zvětšení objemu mědi v krátkém časovém horizontu.

Budeme-li uvažovat proudovou hustotu $J_s = 2,5 \text{ A/mm}^2$, obsahuje generátor 3,43 kg mědi a dosahuje účinnosti 70 %. Uvažujeme-li snížení proudové hustoty na $J_s = 1 \text{ A/mm}^2$, bude generátor obsahovat 8,18 kg mědi a dosahovat účinnosti 86,7 %. V modelovém případě je navýšení ceny generátoru ze zvýšení objemu mědi při ceně měděných vodičů 170 Kč/kg, případně s přírůzkou na technologii vkládání vinutí uvažujeme 200 Kč/kg.

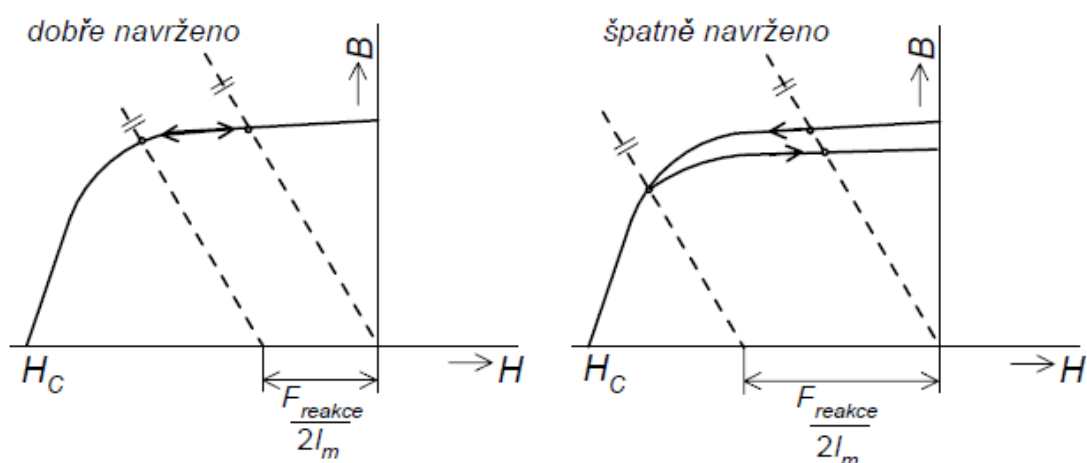
Potom zvýšení ceny generátoru ze zvětšení obsahu mědi bude 950 Kč. Uvažujeme - li výkupní cenu 5 Kč/kWh a rozdíl dodané energie při výše zmíněných účinnostech a při provozu 360 dní v roce, bude během jednoho roku zvýšen finanční zisk. Výkon generátoru při $J_s = 2,5 \text{ A/mm}^2$ je 140 W a při $J_s = 1 \text{ A/mm}^2$ dosahuje 173,6 W. Rozdíl výkonu je 33,6 W.

Rozdíl ve finančním zisku ročně je tedy: $P_z = 0,0336 \cdot 24 \cdot 360 \cdot 5 = 1451 \text{ Kč}$. Zvýšení objemu mědi má při uvažované ceně elektrické energie a provozu návratnost zhruba 8 měsíců.

Protože je uvažovaná návratnost zvýšení objemu mědi příznivá, je zvolena proudová hustota $J_s = 1 \text{ A/mm}^2$.

Kontrola výšky permanentních magnetů kvůli zamezení demagnetizace

Působením reakčního pole statoru může hrozit nebezpečí demagnetizace permanentních magnetů. Kontrolu je nutno řešit graficky, vychází se z nelineární rovnice s jednou neznámou, kterou nelze řešit analyticky. Je třeba vypočítat dvě části rovnice pro zakreslení "zatěžovacích přímk" do hysterezní křivky ve druhém kvadrantu. Pokud se bude pracovní bod při působení reakčního pole nacházet "za kolenem" hysterezní smyčky, dojde k návratu po nové nižší křivce a magnet je částečně odmagnetován. Pro názornost jsou na Obr. 6.1 zobrazeny správný a špatný návrh. [6]

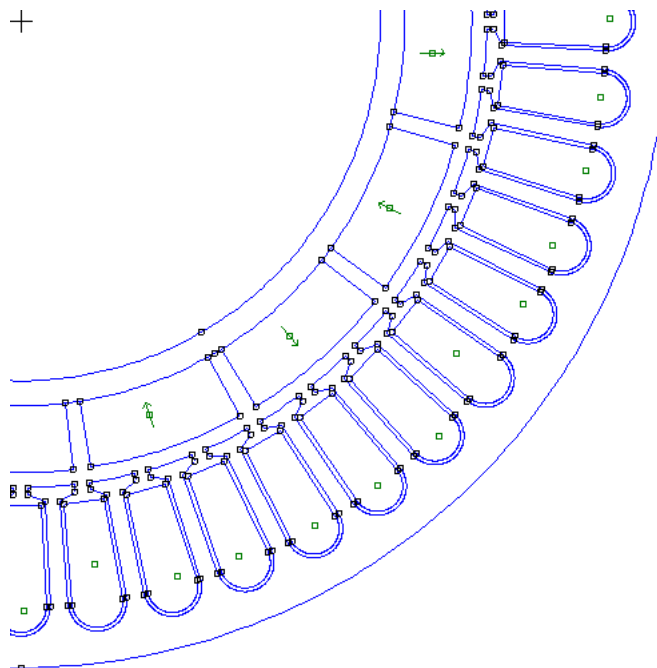


Obr. 6.1: Ukázka správného a nesprávného navržení permanentního magnetu [6]

Po vypočtení a zakreslení zatěžovacích křivek bylo ověřeno, že demagnetizace permanentních magnetů nehrozí. V příloze E se nachází ověření se zakreslenými zatěžovacími křivkami do hysterezní smyčky materiálu MF40.

6.1.1 Geometrie optimalizovaného generátoru

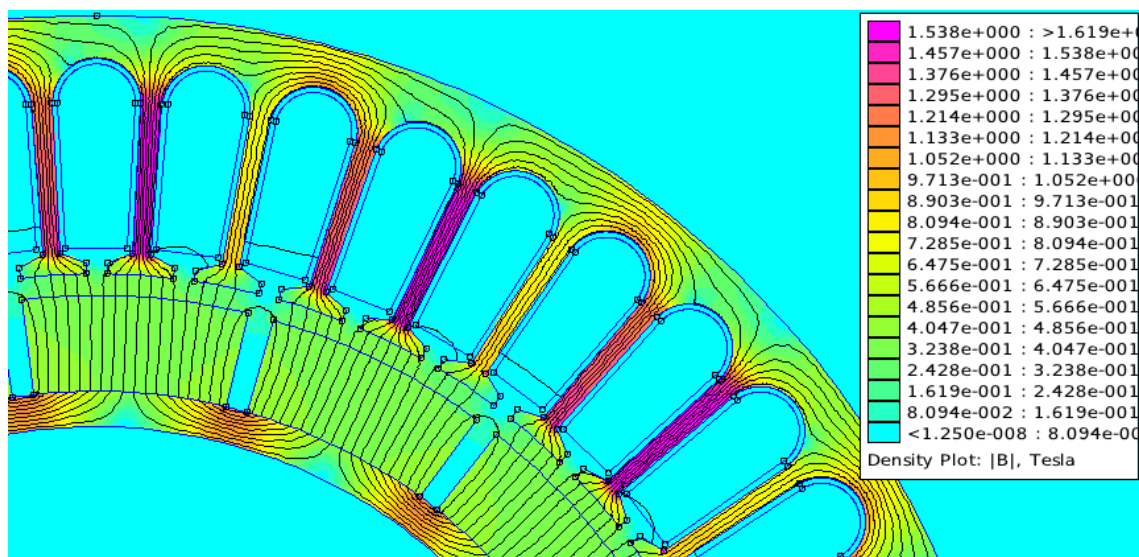
Na Obr. 6.2 je zobrazen výřez z modelu magnetického obvodu generátoru v prostředí FEMM. V porovnání s předchozím návrhem je patrné zvětšení tloušťky magnetů a hlubší stavba drážky kvůli většímu objemu mědi. Pro přehlednost a dobrou čitelnost je zobrazena pouze čtvrtina geometrie generátoru, celá geometrie je k nalezení v příloze F a v příloze H.



Obr. 6.2: Výřez z geometrie optimalizovaného generátoru

6.1.2 Model optimalizovaného generátoru ve FEMM

Na Obr. 6.3 je výřez z modelu pro lepší přehlednost. Je zde řez modelem generátoru se zobrazeným rozložením magnetické indukce. Přiložena legenda pro odečítání magnetické indukce. Porovnání parametrů z analytického výpočtu a z modelu je uvedeno číselně v Tab. 6. Celý model je k vidění v příloze G.



Obr. 6.3: Rozložení magnetické indukce v obvodu

Na modelu bylo ověřeno, že v magnetickém obvodu nedochází k přesycování.

Tab 6: Porovnání parametrů z výpočtu a modelu

Srovnání parametrů z analytického výpočtu s modelem			
Parametr	Jednotka	Analytický výpočet	Model
Maximální indukce v zubu	[T]	1,6	1,62
Maximální indukce ve statorovém jhu	[T]	1,3	1,21
Maximální indukce v rotorovém jhu	[T]	1,3	1,25

6.2 Shrnutí výsledků optimalizace

Tab 7: Tabulka porovnání parametrů generátorů

Veličina	Značka	gen. A	gen. B	gen. C	gen. D	Jednotka
Elektrický výkon generátoru	P_{el}	146	134	140	173	[W]
Příkon generátoru	P_h	200	200	200	200	[W]
Účinnost generátoru	η_g	73	67	70	86,5	[%]
Vnější průměr rotoru	D_r	0,1092	0,1361	0,0955	0,1205	[m]
Vnitřní průměr statoru	D_s	0,1120	0,1389	0,0995	0,1245	[m]
Vnější průměr statorového jha	D_{se}	0,1560	0,1731	0,1332	0,1724	[m]
Výška statorového jha	h_{js}	0,006	0,0035	0,0027	0,0033	[m]
Výška rotorového jha	h_{jr}	0,006	0,0035	0,0027	0,0033	[m]
Ekvivalentní délka vzduchové mezery	l'	0,0303	0,0378	0,0621	0,0783	[m]
Délka jádra generátoru	l	0,0275	0,0350	0,0581	0,0743	[m]
Vzduchová mezera	δ	0,0014	0,0014	0,002	0,002	[m]
Šířka zubu statoru	b_d	0,0041	0,0024	0,0016	0,002	[m]
Počet závitů na fázi	N	408	560	440	280	[-]
Statorový proud	I_s	3,01	2,77	2,89	3,58	[A]
Proudová hustota vinutí statoru	J_s	2,5	2,5	2,5	1	[A/mm ²]
Odpor vinutí statoru	R	1,875	2,702	2,278	0,547	[Ω]
Magnetická indukce ve vzd. mezeře	B_δ	0,95	0,45	0,45	0,45	[T]
Magnetická indukce základní složka	B_{max}	0,785	0,372	0,358	0,358	[T]
Výška permanentních magnetů	h_{PM}	0,0045	0,0073	0,0085	0,0089	[m]

Pro lepší orientaci v uvedených generátorech jsou generátory označeny písmeny. Generátor navržený Šejnouhou označen jako generátor A. Přepočtený a neoptimalizovaný generátor s feritovými magnety je generátor B. Optimalizovaný generátor s feritovými magnety necht' je označen jako generátor C. Generátor

optimalizovaný se sníženou proudovou hustotou je generátor D. Sestava generátoru a převodovky z původní koncepce stroje uvažujeme jako generátor 1. Porovnání parametrů generátorů je uvedeno v Tab. 6.

6.3 Ekonomická rozvaha

Uvažujeme sestavu s generátorem 1:

- mechanický výkon na hřídeli turbíny uvažován 200W,
- účinnost převodovky 95 %,
- účinnost generátoru 55 %,
- elektrický výkon mikroelektrárny $P_{el} = 104,5 \text{ W}$.

Výroba elektrické energie při 80% využití výkonu vodní turbíny (tzn. turbína je v provozu něco přes 19 hodin denně).

$$P_R = 0,1045 \cdot 0,8 \cdot 24(\text{hodin}) \cdot 365(\text{dní}) = 732 \text{ kWh/rok [3]}$$

6.3.1 Generátor B

Celková účinnost celého zařízení bude vyšší o ztráty způsobené převodem (5 %) a o vyšší účinnost generátoru.

Účinnost generátoru je 67 %.

Elektrický výkon mikroelektrárny $P_{el} = 134 \text{ W}$

Výroba elektrické energie při 80% využití výkonu vodní turbíny.

$$P_R = 0,134 \cdot 0,8 \cdot 24 \cdot 365 = 939 \text{ kWh/rok}$$

6.3.2 Generátor D

Účinnost generátoru je 86,7 %.

Elektrický výkon mikroelektrárny $P_{el} = 173,4 \text{ W}$

Výroba elektrické energie při 80% využití výkonu vodní turbíny.

$$P_R = 0,1734 \cdot 0,8 \cdot 24 \cdot 365 = 1215 \text{ kWh/rok}$$

Rozdíl v množství vyrobené energie na modelovém případě – rozdíl mezi generátorem 1 a generátorem D činí $\Delta P = 1215 - 732 = 483 \text{ kWh/rok}$

Dochází k navýšení výroby elektrické energie při stejném vstupním výkonu o 66,9 %. V desetiletém horizontu s modelovou cenou 5 Kč/kWh činí rozdíl 24 150 Kč.

6.4 Shrnutí výsledků

Pozitivním zjištěním je, že lze s feritovými magnety dosáhnout podobné účinnosti jako s použitím NdFeB magnetů a to při stejné proudové hustotě vodiče a v případě stroje s osmi pólovými páry.

Pro obecné porovnání cen feritových magnetů a neodymových byl položen dotaz výrobci, firmě Magnety, s. r. o. od které byl již dříve vyžádán technický list od feritového materiálu MF40. Cena hranolu feritového magnetu $100 \cdot 100 \cdot 25$ mm je 150 Kč a cena stejně velkého NdFeB magnetu je 1900 Kč. Podle těchto cen lze orientačně určit cenu daného objemu NdFeB magnetů v generátoru A - 250 Kč a cenu feritových magnetů pro generátor D - 120 Kč

7 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo přepočítat generátor na feritové magnety a optimalizovat jej na základě výsledků citlivostních analýz.

Přepočet generátoru s NdFeB magnety na generátor s magnety feritovými byl uskutečněn z důvodu nižší ceny feritových magnetů. Poté, co cena NdFeB magnetů prudce vzrostla, a zároveň se objevily na trhu i silnější feritové materiály, se přechod na feritové magnety přímo nabízí. Je nutné upřesnit, že toto lze aplikovat tam, kde by tuto variantu neomezovaly z toho vyplývající větší rozměry a v některých případech i hmotnost celého stroje.

Nejprve uvádím parametry generátoru pro následný přepočet na feritové magnety. Poté představuji různé druhy permanentních magnetů. Z těchto vstupních dat jsem provedl analytický výpočet generátoru s feritovými magnety a jeho model ověřil metodou konečných prvků.

V mé práci byly rozebrány vlivy, které ovlivňují celkovou účinnost generátoru s následně vybranými čtyřmi parametry, na kterých byla provedena citlivostní analýza. Z citlivostních analýz je patrný vliv parametrů na celkovou účinnost přepočteného generátoru. Podle očekávání je nejvýznamnějším parametrem proudová hustota, která výrazně ovlivňuje ohmické ztráty vinutí a tím účinnost generátoru. Ostatní parametry mají vliv podstatně menší.

Na základě výsledků z citlivostní analýzy byly upraveny parametry pro nový výpočet generátoru. Ten byl ověřen modelem ve FEMM a byla provedena kontrola správnosti tloušťky magnetu pro zamezení demagnetizace.

V budoucnu je možné na tuto práci navázat. Je nutné vyřešit:

- vypočtení reálného provozního oteplení vinutí, kdy je předpokládána nižší provozní teplota nežli byla uvažována v návrhu a tím zmenšení Jouleových ztrát, ověřit možnost chlazení vodou nebo odvod tepla konstrukcí a vliv na provozní teplotu,

- uložit magnety tangenciálně do rotoru tak, že bude ve vzduchové mezeře dosaženo vyšší indukce než uložním magnetů na povrchu rotoru a tím zmenšení stroje [8],
- vyrobit prototyp na odzkoušení.

Literatura

- [1] PYRHÖNEN, Juha; JOKINEN, Tapani; HRABOVCOVÁ. *Design of Rotating Electrical Machines*. Lappeenranta University of Technology: John Wiley & Sons, 2008. ISBN 978-0-470-69516-6.
- [2] DRAXLER Karel, KAŠPAR Petr, RIPKA Pavel. *Magnetické prvky a měření*. Česká technika – nakladatelství ČVUT, Praha, 1994. ISBN 978-80-01-03970-0
- [3] ŠEJNOHA, Jaromír. *Generátor pro malou vodní elektrárnu*. Liberec, 2011. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Leoš Beran, Ph.D.
- [4] MEEKER David. *Finite Element Method Magnetics, Version 4.2 User's Manual*. [online]. [cit. 8. 4. 2013] 2010. Dostupné na [www: http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf](http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf)
- [5] PETER SEKEÁK — VALÉRIA HRABOVCOVÁ — JUHA PYRHONEN — LUKÁŠ KALAMEN — PAVOL RAFAJDUS — MATÚŠ ONUFER. FERRITES AND DIFFERENT WINDING TYPES IN PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR. *Journal of ELECTRICAL ENGINEERING*. 2012, č. 63. ISSN ISSN 1335-3632. DOI: 10.2478/v10187-012-0024-8.
- [6] VOREL, Pavel. *Výkonové elektromechanické systémy v silničních vozidlech*. Brno, 2005. Habilitační. VUTBR FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY.
- [7] ŘEZNÍČEK, Pavel. *Jednoduchý model magnetického obvodu SMPM*. Liberec, 2012. Semestrální projekt. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. Vedoucí práce Ing. Leoš Beran, Ph.D.
- [8] SEREBRYAKOV, A., N. LEVIN a A. SOKOLOV. Direct-Drive Synchronous Generators with Excitation from Strontium-Ferrite Magnets: Efficiency Improvement. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2012-01-1, vol. 49, issue 4, s. -. DOI: 10.2478/v10047-012-0018-0. Dostupné z: <http://www.degruyter.com/view/j/lpts.2012.49.issue-4/v10047-012-0018-0/v10047-012-0018-0.xml>
- [9] MAGSY, s.r.o. [online]. 2013 [cit. 2013-04-08]. Dostupné z: <http://www.magsy.cz/24802-feritovy-magnet>

[10] *Sinomag, s.r.o.* [online]. 2013 [cit. 2013-04-08]. Dostupné z:
http://www.sinomag.cz/sinomag.cz/data/sinomag/downloads/Permanentni_magnety.pdf

[11] PEŠEK, Michal. *PROGRAM FEMM – PODKLADY PRO VÝUKU V ELEKTRONICKÉ FORMĚ*. Brno, 2009. Bakalářská práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.

Příloha A

katalogový list materiálu M800-50A

T	W/kg at 50 Hz	VA/kg at 50 Hz	A/m at 50 Hz
0,1	0,05	0,17	84,5
0,2	0,18	0,44	107
0,3	0,43	0,76	121
0,4	0,70	1,12	133
0,5	1,01	1,52	145
0,6	1,35	1,97	156
0,7	1,72	2,46	168
0,8	2,13	3,00	180
0,9	2,56	3,60	194
1,0	3,05	4,27	209
1,1	3,59	5,04	228
1,2	4,20	5,96	254
1,3	4,91	6,95	304
1,4	5,70	8,49	402
1,5	6,60	11,9	660
1,6	7,54	25,2	1480
1,7	8,30	67,4	3710
1,8	8,83	151	7300

Loss at 1.5 T , 50 Hz, W/kg	6,60
Loss at 1.0 T , 50 Hz, W/kg	3,05
Anisotropy of loss, %	5
Magnetic polarization at 50 Hz	
H = 2500 A/m, T	1,65
H = 5000 A/m, T	1,74
H = 10000 A/m, T	1,85
Coercivity (DC), A/m	100
Relative permeability at 1.5 T	1810
Resistivity, $\mu\Omega\text{cm}$	23
Yield strength, N/mm ²	300
Tensile strength, N/mm ²	415
Young's modulus, RD, N/mm ²	210 000
Young's modulus, TD, N/mm ²	220 000
Hardness HV5 (VPN)	130

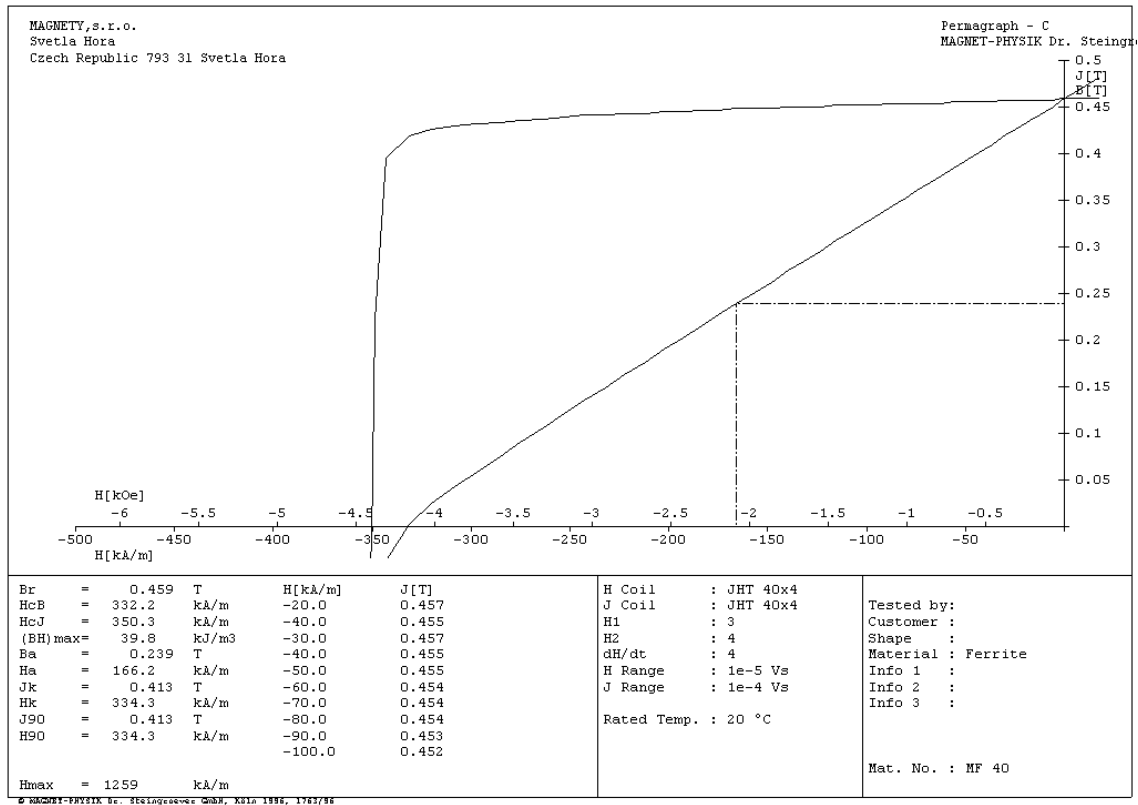
katalogový list materiálu M700-50A

T	W/kg at 50 Hz	VA/kg at 50 Hz	A/m at 50 Hz
0,1	0,05	0,14	67,8
0,2	0,16	0,36	88,3
0,3	0,37	0,63	99,2
0,4	0,59	0,92	108
0,5	0,84	1,23	116
0,6	1,12	1,58	124
0,7	1,43	1,96	132
0,8	1,77	2,38	142
0,9	2,15	2,84	152
1,0	2,57	3,36	164
1,1	3,03	3,96	180
1,2	3,55	4,71	206
1,3	4,13	5,76	254
1,4	4,83	7,57	363
1,5	5,68	12,4	690
1,6	6,54	30,3	1760
1,7	7,29	79,7	4230
1,8	7,81	172	8130

Loss at 1.5 T , 50 Hz, W/kg	5,68
Loss at 1.0 T , 50 Hz, W/kg	2,57
Anisotropy of loss, %	5
Magnetic polarization at 50 Hz	
H = 2500 A/m, T	1,64
H = 5000 A/m, T	1,72
H = 10000 A/m, T	1,84
Coercivity (DC), A/m	100
Relative permeability at 1.5 T	1730
Resistivity, $\mu\Omega\text{cm}$	25
Yield strength, N/mm ²	285
Tensile strength, N/mm ²	405
Young's modulus, RD, N/mm ²	210 000
Young's modulus, TD, N/mm ²	220 000
Hardness HV5 (VPN)	125

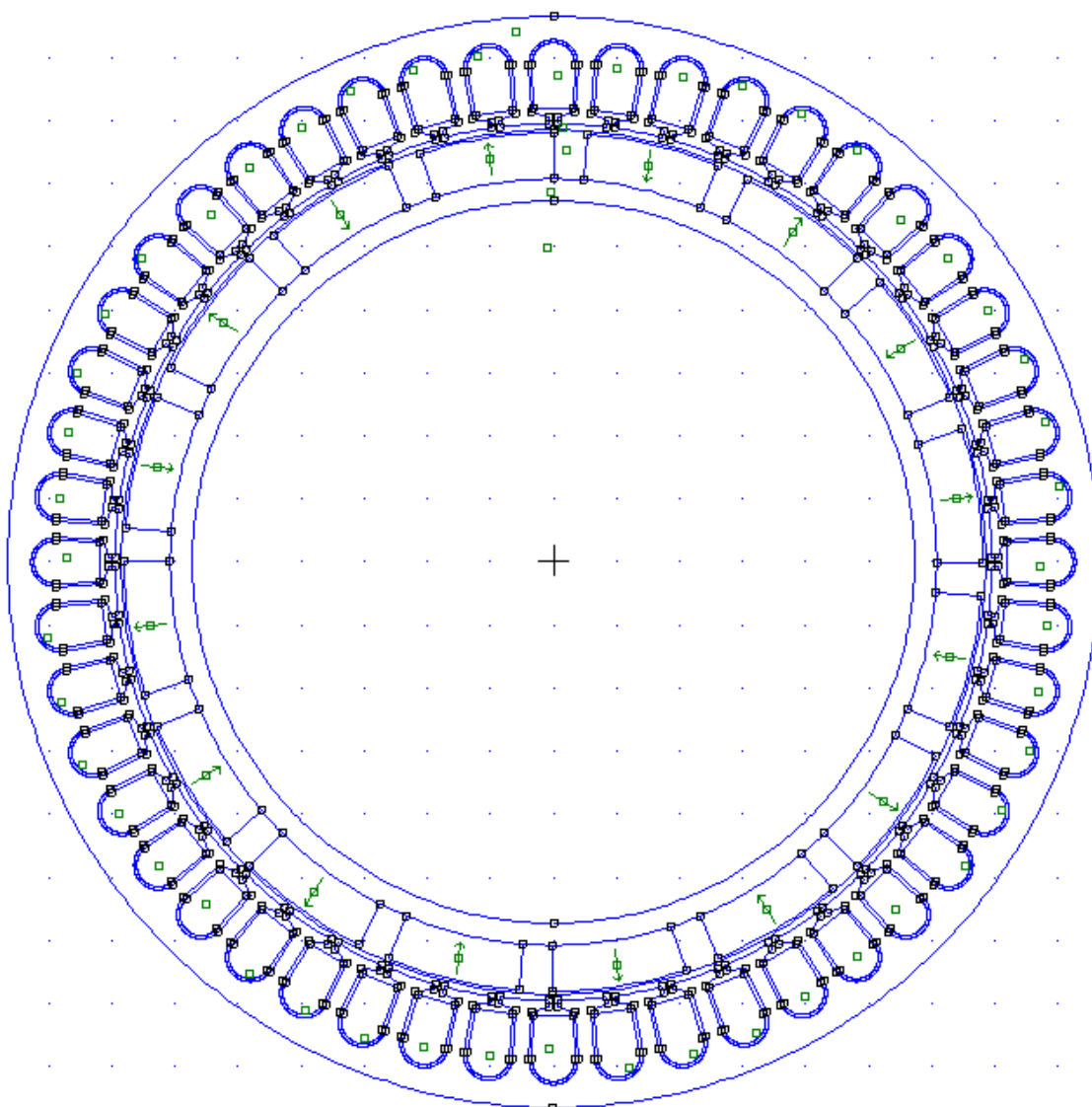
Příloha B

feritový materiál MF40



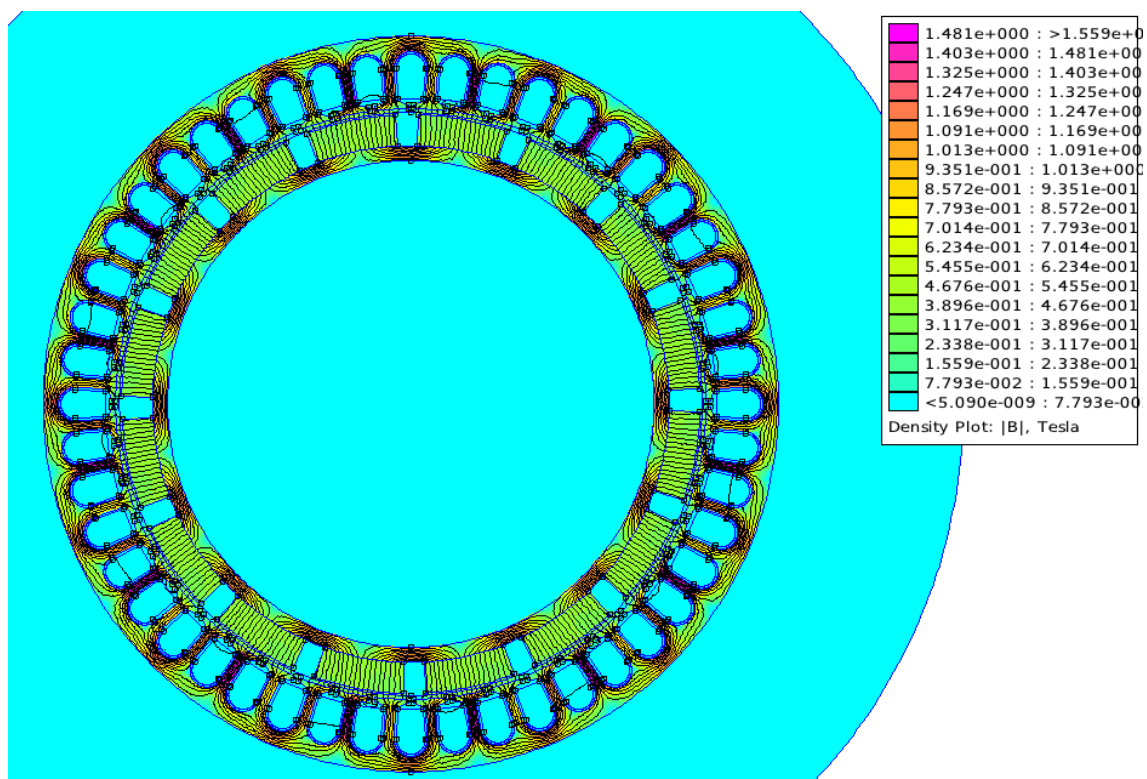
Příloha C

geometrie magnetického obvodu neoptimalizovaného generátoru s feritovými magnety



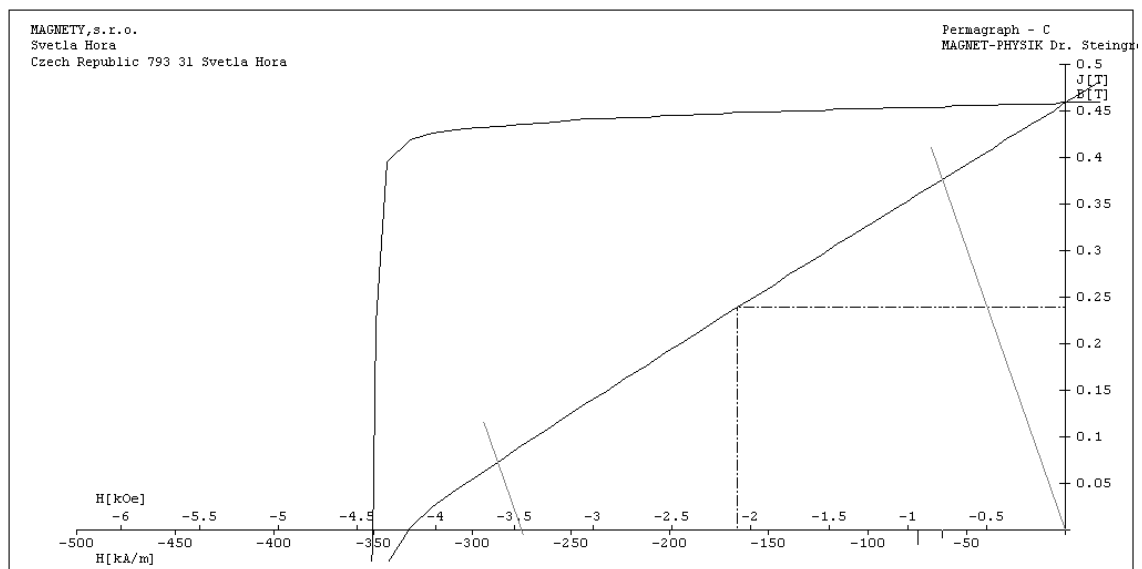
Příloha D

magnetický obvod neoptimalizovaného generátoru s feritovými magnety – zobrazena indukce a siločáry magnetického pole



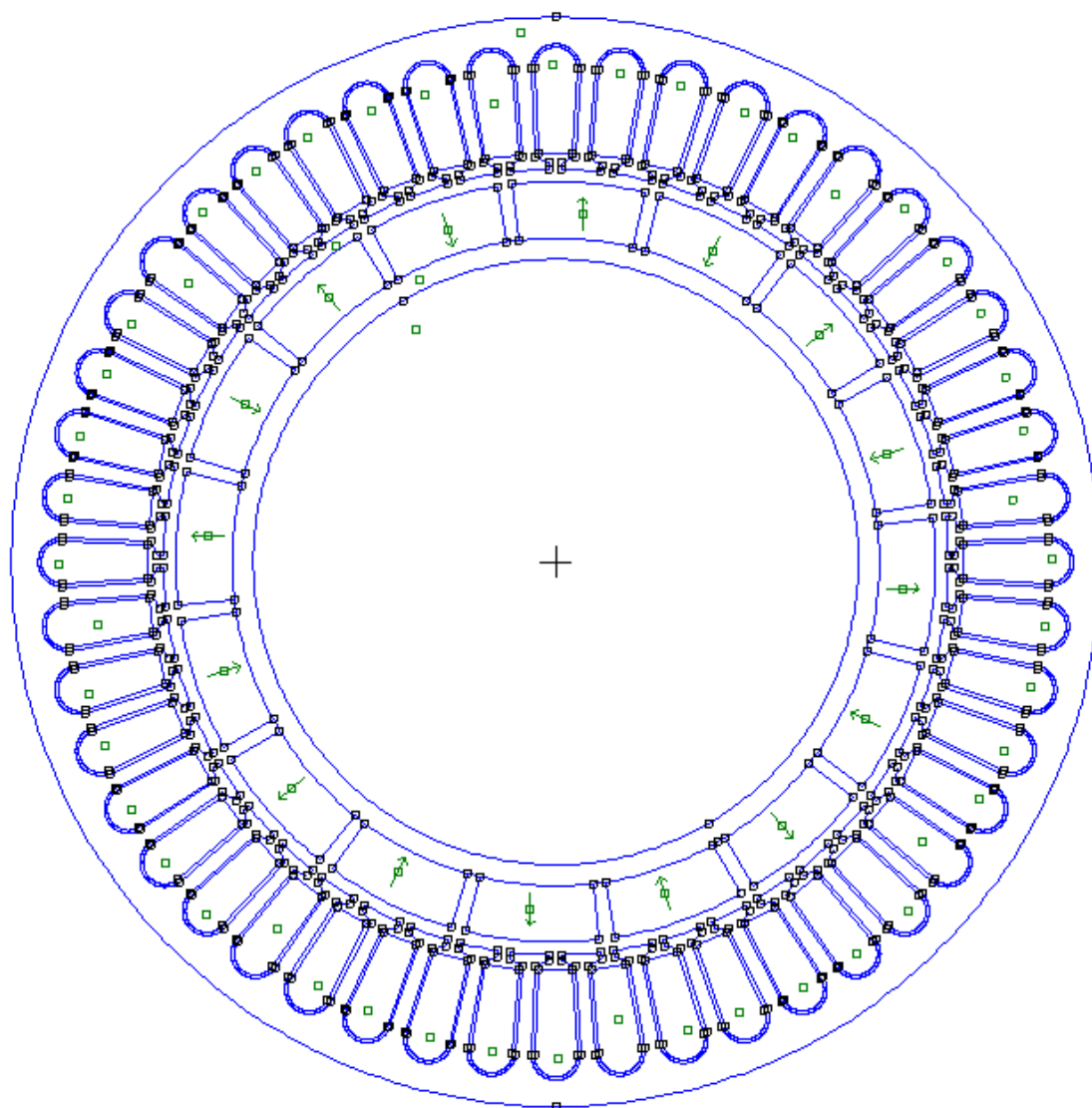
Příloha E

zatěžovací přímky k pracovním bodům



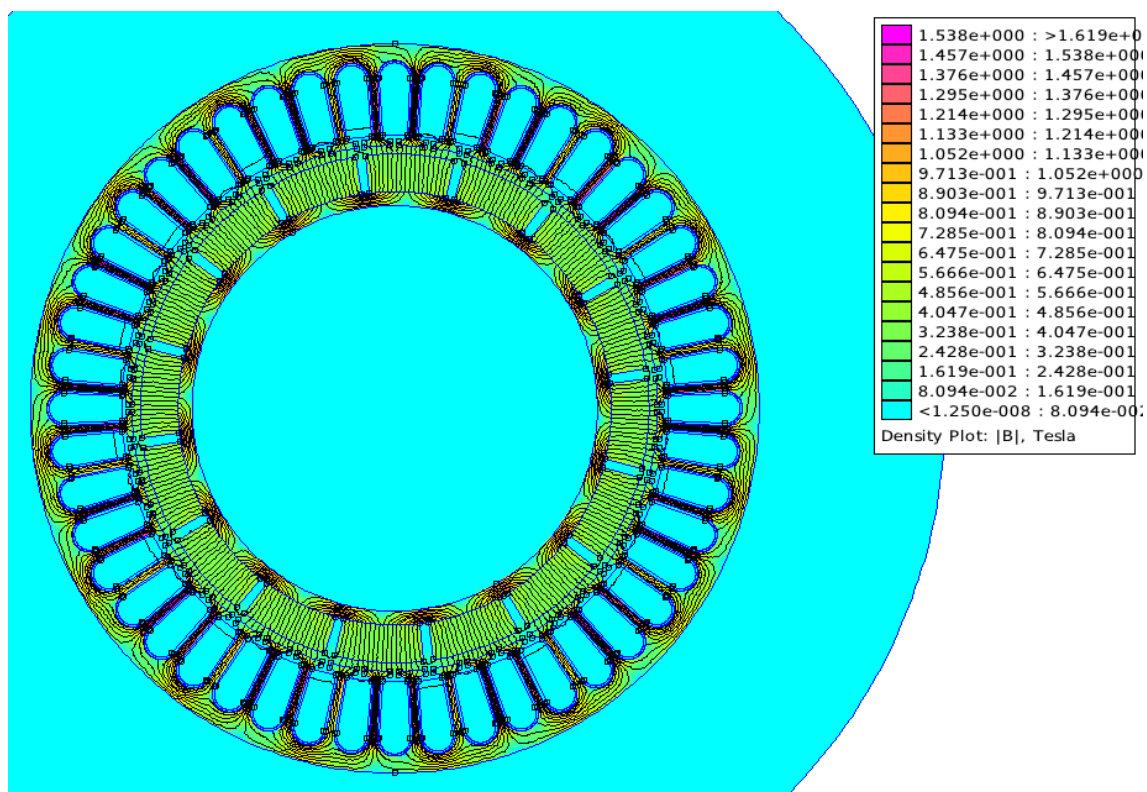
Příloha F

geometrie magnetického obvodu optimalizovaného generátoru s feritovými magnety



Příloha G

magnetický obvod optimalizovaného generátoru s feritovými magnety zobrazena indukce a siločáry magnetického pole



Příloha H

technický výkres magnetického obvodu optimalizovaného generátoru s feritovými magnety

